

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

OPTICKÉ KOMUNIKAČNÍ ROZHRANÍ PRO LASERGAME

OPTICAL COMMUNICATION INTERFACE FOR LASERGAME

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Vykydal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Kubíček, Ph.D.

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

Student: Jan Vykydal

ID: 186240

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Optické komunikační rozhraní pro LaserGame

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou optické detekce a komunikace v oblasti LaserGame. S ohledem na známá řešení komerčně dostupných optických systémů pro LaserGame navrhnete koncepci nového vlastního nízkonákladového systému, který bude mít srovnatelné parametry. Systém bude zajišťovat optickou detekci zásahu a bezdrátovou komunikaci s řídicím systémem hry. Ověřte funkčnost základních modulů navrženého systému.

Realizujte navržený systém a ověřte jeho kvalitativní parametry. Zaměřte se na spolehlivost, detekce, přesnost optického systému, dosah a spolehlivost komunikace a odolnost celého systému. Na základě testování navrhnete možná vylepšení systému a ty realizujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] MARTINEK, R. Senzory v průmyslové praxi. BEN-technická literatura: Praha., 2004. ISBN 80-7300-114-4.

[2] CATSOULIS, J. Designing embedded hardware. 2nd ed. Sebastopol: O'Reilly, 2005, xvi, 377 s. ISBN 05-960-0755-8.

Termín zadání: 5. 2. 2018

Termín odevzdání: 24. 5. 2018

Vedoucí práce: Ing. Michal Kubíček, Ph.D.



prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá návrhem komunikačního rozhraní v infračerveném pásmu elektromagnetických vln, které bude použitelné pro laser game.

KLÍČOVÁ SLOVA

Laser game, infračervený, luminiscenční dioda, fotodioda, laser, optoelektronika

ABSTRACT

This work deals with the design of the communication interface in the infrared band of electromagnetic waves, which will be applicable to the laser game.

KEYWORDS

Laser game, infrared, luminescent diode, photodiode, laser, optoelectronics

VYKYDAL, Jan. *Optické komunikační rozhraní pro LaserGame*. Brno, Rok, 83 s. Semestrální projekt. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce: Ing. Michal Kubíček, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svůj semestrální projekt na téma „Optické komunikační rozhraní pro Laser-Game“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto semestrálního projektu jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Michalu Kubíčekovi, Ph.D. a panu Ing. Aleši Povalačovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora

OBSAH

Úvod	11
1 Úvod do problematiky Laser Game systému	12
1.1 Laser Game	12
1.2 Historie Laser Game	12
1.3 Laser Game systém	13
1.4 Laser Game systémy na trhu	14
1.4.1 EVO-5	14
1.4.2 Další systémy	15
2 Optoelektronické součástky používané při laser game	16
2.1 Optické vysílače	16
2.2 Optické přijímače	18
2.2.1 Fotodioda	18
2.2.2 Fototranzistor	19
2.2.3 Integrované přijímače	19
3 Zabezpečení dat proti chybám	21
3.1 Parita	21
3.2 Cyklický redundantní součet	22
3.2.1 Generační polynom	22
3.2.2 Ukázka výpočtu kontrolního součtu	22
3.2.3 Výpočet CRC pole bajtů	23
4 Návrh systému pro infračervený přenos dat	25
4.1 Požadavky na systém	25
4.2 Návrh přenášeného rámce	25
4.3 Výběr IR vysílače	26
4.4 Výběr IR přijímače	26
4.5 Přenos IR signálu	27
4.6 První návrh systému IR přenosu dat	28
4.6.1 Vysílač	28
4.6.2 Přijímač	28
4.6.3 Zhodnocení systému	29
4.7 Druhý návrh systému IR přenosu dat	29
4.7.1 Komunikační protokol	30
4.7.2 Zhodnocení	31

5	Rádiová komunikace	32
5.1	Topologie sítě	32
5.2	Přenášený rámec	32
5.3	Praktická realizace	33
6	Napájecí systém vesty	34
6.1	Zvyšující měnič	34
6.2	Nabíjecí obvod	36
6.3	Monitorování náboje	38
6.4	Topologie napájecího systému	39
7	Zobrazovací systém	40
8	Generátor zvuků	41
8.1	Požadavky na generátor	41
8.2	Realizace generátoru	41
8.3	Komunikační protokol	42
9	Realizace Laser Game systému	43
9.1	Vesta	43
9.2	Zbraň	44
9.3	Směrovač	45
10	Závěr	46
	Literatura	47
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	48
A	Přiložená schémata zapojení	49
B	Přiložené osazovací plány	71
C	Přiložené výkresy plošných spojů	74
D	Foto dokumentace	79

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Znázornění Laser Game (LG) systému	13
2.1	Technologické provedení LED pro viditelné světlo	16
2.2	Technologické provedení IR LED	17
2.3	Dvojitá heterogenní struktura polovodičového laseru	17
2.4	Struktura PIN diody	19
2.5	Náhradní schéma fototranzistoru	19
2.6	Blokové schéma integrovaného přijímače OSRB38C9BA	20
3.1	Ukázka sudé parity	21
3.2	Ukázka liché parity	21
4.1	Obrázek struktury rámce	25
4.2	Směrová charakteristika OSRB38C9BA, převzato z [11]	27
4.3	Ukázka funkce ideálního integrovaného detektoru	27
4.4	Zjednodušené schéma první verze systému pro IR přenos dat	28
4.5	Zjednodušené schéma druhé verze systému pro IR přenos dat	29
4.6	Ukázka jednoho rámce přenášeného IR protokolem	30
5.1	Blokové schéma topologie sítě	32
5.2	Znázornění rámce rádiové komunikace	32
5.3	Blokové schéma komunikačního řetězce z moduly HM-TRP	33
6.1	Blokové schéma zvyšujícího měniče	34
6.2	Ověření funkce simulací zvyšujícího měniče v programu LTspice	36
6.3	Nabíjecí obvod BQ24192, převzato z [7]	37
6.4	Blokové schéma obvodu LTC2941, převzato z [8]	38
6.5	Blokové schéma napájecího systému	39
7.1	Blokové schéma zobrazovacího systému	40
8.1	blokové znázornění zvukového generátoru	41
9.1	Blokové schéma vesty	43
9.2	Blokové schéma zbraně	44
9.3	Blokové schéma směrovače	45
A.1	Schéma zapojení hlavní desky vesty strana 1	50
A.2	Schéma zapojení hlavní desky vesty strana 2	51
A.3	Schéma zapojení hlavní desky vesty strana 3	52
A.4	Schéma zapojení hlavní desky vesty strana 4	53
A.5	Schéma zapojení hlavní desky vesty strana 5	54
A.6	Schéma zapojení hlavní desky vesty strana 6	55
A.7	Schéma zapojení hlavní desky vesty strana 7	56
A.8	Schéma zapojení hlavní desky vesty strana 8	57
A.9	Schéma zapojení hlavní desky vesty strana 9	58

A.10 Schéma zapojení hlavní desky vesty strana 10	59
A.11 Schéma zapojení hlavní desky vesty strana 11	60
A.12 Schéma zapojení hlavní desky vesty strana 12	61
A.13 Schéma zapojení hlavní desky vesty strana 13	62
A.14 Schéma zapojení hlavní desky vesty strana 14	63
A.15 Schéma zapojení nabíječky vesty strana 1	64
A.16 Schéma zapojení nabíječky vesty strana 2	65
A.17 Schéma zapojení zbraně	66
A.18 Schéma zapojení desky na rameno	67
A.19 Schéma zapojení zobrazovače	68
A.20 Schéma zapojení směrovače strana 1	69
A.21 Schéma zapojení směrovače strana 2	70
B.1 Osazovací plán směrovače	71
B.2 Osazovací plán zobrazovací jednotky	71
B.3 Osazovací plán hlavní desky	72
B.4 Osazovací plán desky na záda	72
B.5 Osazovací plán desky na rameno	73
B.6 Osazovací plán zbraně	73
C.1 Plošný spoj desky na záda v měřítku 1:1, pohled ze strany součástek .	74
C.2 Plošný spoj desky na záda v měřítku 1:1, pohled ze strany spojů . . .	74
C.3 Plošný spoj hlavní desky v měřítku 1:1, pohled ze strany součástek .	75
C.4 Plošný spoj hlavní desky v měřítku 1:1, pohled ze strany spojů	75
C.5 Plošný spoj směrovače v měřítku 1:1, pohled ze strany součástek . . .	76
C.6 Plošný spoj směrovače v měřítku 1:1, pohled ze strany spojů	76
C.7 Plošný spoj desky na rameno v měřítku 1:1, pohled ze strany součástek	76
C.8 Plošný spoj desky na rameno v měřítku 1:1, pohled ze strany spojů .	77
C.9 Plošný spoj zbraně v měřítku 1:1, pohled ze strany součástek	77
C.10 Plošný spoj zbraně v měřítku 1:1, pohled ze strany spojů	77
C.11 Plošný spoj zobrazovací jednotky v měřítku 1:1, pohled ze strany součástek	78
C.12 Plošný spoj zobrazovací jednotky v měřítku 1:1, pohled ze strany spojů	78
D.1 Fotografie hlavní desky	79
D.2 Fotografie desky na záda vesty	80
D.3 Fotografie směrovače	80
D.4 Fotografie desky na rameno	81
D.5 Fotografie desky zobrazovače	81
D.6 Fotografie desky zbraně	82
D.7 Kompletní sada elektroniky pro jednoho hráče	83

SEZNAM TABULEK

4.1	Definice časování komunikačního protokolu	30
8.1	Kompletní seznam příkazů zvukového generátoru	42

ÚVOD

Práce se zabývá společenskou, sportovní, zábavnou hrou zvanou laser game. Nejprve se zaměřuje na vymezení pojmu hry laser game, následně přejde k její historii a vzniku. V teoretické části práce jsou diskutovány optoelektronické součástky, které je možné pro návrh systému laser game použít se zaměřením na jejich funkci.

Autorovým cílem je vyvinout herní systém, který bude možné provozovat i v komerčních arénách.

Stěžejní částí práce je návrh komunikačního rozhraní a protokolu pro předávání informací pomocí infračerveného záření. A protokolu pro rádiovou komunikaci mezi vestami a směrovačem.

Laser game arén existuje i v ČR velký počet. Převážná většina z nich používá vybavení, které se pořizuje za statisíce korun a přitom jsem názoru, že je reálné jej vyrobit mnohem levněji. Tato práce si klade za cíl vyvinout systém, který bude možné nasadit v arénách a jeho pořizovací cena bude přijatelnější.

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY LASER GAME SYSTÉMU

1.1 Laser Game

Laser Game, někdy také nazývána i Laser Tag, je označení pro společenské hry, motivované sci-fi, využívající moderní elektroniku. Hráči získávají body za zásahy infračerveným paprskem z jejich zbraně do zásahových čidel soupeřů či jiných objektů vybavených zásahovým čidlem. A naopak o své body přicházejí, jestliže se jejich zásahová čidla stanou terčem nepřátelských IR paprsků. Cílem každého hráče je získat co nejvíce bodů.

Nejčastěji se hra odehrává v místnosti speciálně upravené pro tento účel, označované jako aréna. Stěny, strop a podlaha arény bývají zpravidla pokryty tmavou barvou (černé koberce, koženky a podobné materiály) tak, aby se zabránilo odrazům IR paprsků. Zdi v arénách jsou často vypolstrovány, aby se snížilo riziko zranění hráčů. Obvykle arény nejsou jen klasické místnosti se čtyřmi stěnami a rovnou podlahou, nýbrž často bývají značně členité, vybavené úkryty a překážkami.

Pro zpestření hry mohou být arény vybaveny i další elektronikou, například optickými závorami, minami či světelnými nebo kouřovými efekty.

1.2 Historie Laser Game

Koncem sedmdesátých a na začátku osmdesátých let vyvíjela firma Lockheed Martin Information Systems pro armádu Spojených států amerických systém, využívající IR paprsky pro trénink boje, nazývaný vojenský simulátor střelby – Multiple Integrated Laser Engagement System (MILIES). Systém funguje na stejném principu jako LG. Voják má na hlavní zbraň IR vysílač, který reaguje na stisk spouště. Voják je oděn ve speciálním obleku s IR senzory. Při zásahu vojáka jsou odeslány z obleku informace do řídicí jednotky, která vyhodnotí, zda je voják zraněn či virtuálně mrtev - používání tohoto systému je bezpečnější než využití konvenčních zbraní. V roce 1992 vyšla nová verze tohoto systému pojmenovaná MILIES2000, která navíc po virtuální smrti vojáka zablokuje jeho další střelbu a akusticky ohlásí zasažení. MILIES využívá od roku 2002 i Armáda České republiky a také i ostatní země s Severoatlantická aliance – North Atlantic Treaty Organization (NATO).

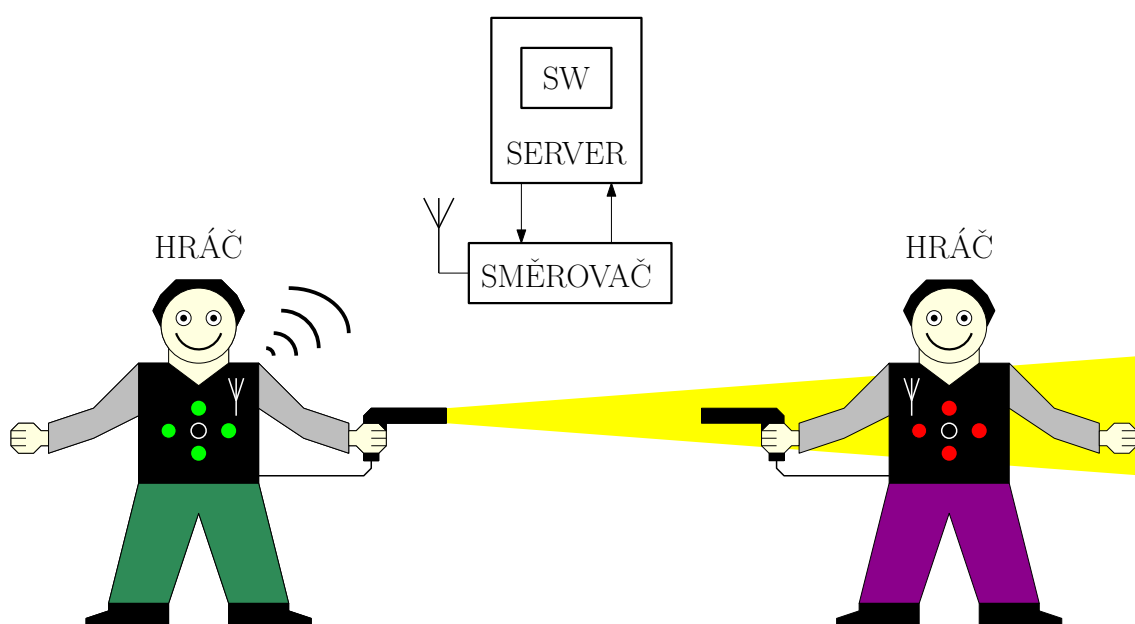
Prvním komerčně prodávaným zařízením, se kterým je spojován vznik LG, je hračka Star Trek Electronic Phaser od společnosti South end Electronics, která byla uvedena na trh v roce 1979. Hračka má tvar futuristické zbraně inspirované Star

Trekem. Součástí zbraně je signalizační blok, který pomocí LED a reproduktoru indikuje zásah. A blok střelby vybavený IR vysílací LED.

1.3 Laser Game systém

LG systém je soustava zahrnující Hardware (HW), Firmware (FW) a Software (SW) umožňující hrát LG. Tento systém lze tedy chápat jako vybavení nezbytné pro provozování celé arény.

Nejdůležitějšími součástmi LG systému jsou vesty, zbraně, komunikační směrovač a řídicí osobní počítač – Personal Computer (PC), LG systém může být dále doplněn například o optické závory, miny či bomby.



Obr. 1.1: Znázornění LG systému

Řídicí počítač má za úkol prostřednictvím směrovače komunikovat s vestami, případně i dalšími zařízeními v síti. Hostuje řídicí SW, pomocí něhož operátor arény ovládá hru. Zajišťuje nakonfigurování vest, v průběhu hry stahuje z vest aktuální údaje a vyhodnocuje pořadí hráčů. Často bývá doplněn tiskárnou, díky níž po vyhodnocení hry vytiskne statistiky z právě odehrané hry.

Směrovač zajišťuje směrování v bezdrátové síti - zprostředkovává tedy duplexní spojení mezi vestami a počítačem.

Vesta je oděv, který nosí hráči - má dvě hlavní funkce, detekovat zásahy a komunikovat s řídicím počítačem. Další funkcí vesty je barevná identifikace hráčů pomocí RGB LED. Vesta může zajišťovat i zvukové efekty, či zobrazovat hráči jeho statistiky z aktuální hry. Vesta také komunikuje se zbraní hráče a vyhodnocuje, jestli může daný hráč střílet. Existují řešení, kdy je vesta nahrazena systémem tagů upevněných na oblečení, tato varianta ale není moc oblíbená vzhledem k tomu, že upevňování tagů je zdlouhavé a během hry hrozí jejich odpadnutí.

Zbraň má jednoduchou úlohu, zajišťuje vysílání IR paprsku, který při zásahu vesty způsobí virtuální zabití hráče. Také může obsahovat IR detektor, díky kterému může být signalizováno poškození zbraně jejím zásahem. Dále může být i zbraň vybavena signalizační RGB LED pro identifikaci týmu, svítilnou či displejem.

1.4 Laser Game systémy na trhu

Zjišťování informací o systémech na trhu není snadné, výrobci mají na webových stránkách obvykle jen minimum informací, které vedou ke kontaktnímu formuláři pro případné kupce.

1.4.1 EVO-5

EVO-5 je nejpoužívanějším LG systémem v České republice. Vyvíjí jej nizozemská firma LaserMaxx a v Česku je nasazen například v arénách v Praze, Brně, Olomouci, Ostravě a Zlíně. Protože je tolik známý, je považován za nepsaný standard a můj systém je jím do značné míry ovlivněn. Po kontaktování mi výrobce poskytl alespoň ceníky. Pořizovací cena tohoto systému pro vybavení menší arény začíná na € 29 995, což je hlavním důvodem, proč se vývojem nového konkurenceschopného systému zabývat. Systém EVO-5 umožňuje hru až 65 hráčů. Autor měl možnost si tento systém prohlédnout, následuje jeho rámcový popis:

Vesta má na hrudi upevněnou hlavní DPS. Ta obsahuje řídicí mikrokontrolér, komunikační WiFi modul, jeden IR detektor obklopen čtveřicí RGB LED pro identifikaci týmu, znakový displej a konektory pro připojení zbraně a dalších DPS. Na zádech vesty je upevněn modul obsahující nabíječku, IR detektor a čtyři RGB LED. Na zádech vesty je také upevněn akumulátor, který napájí celou vestu i zbraň. Dále má vesta dvě totožné DPS na ramenou, každá obsahuje tři IR detektory a dvě RGB LED.

Zbraň má ve svých útrokách vysílací 5mm IR LED diodu s velmi malým vyzařovacím úhlem. Pro ještě větší zúžení vysílaného paprsku je tato dioda vsazena do 10cm mosazné trubičky, to má za následek zvýšení směrové selektivity zbraně. LaserMaxx na svých stránkách uvádí, že vesta je schopna detekovat zásah z této zbraně do vzdálenosti 35 m. Dále zbraň obsahuje jeden IR detektor. Zásah zbraně má stejné následky jako zasažení hráče. Dále zbraň obsahuje a dvě RGB LED pro identifikaci týmu a jednu bílou 5mm LED, která slouží jako svítlna. Dále ve zbrani jsou dva mikropínače, jeden slouží jako spoušť a druhý má programovatelnou funkci a to pojistku střelby nebo rozsvícení svítilny.

Řídící počítač je založen na klasickém PC s operačním systémem Microsoft Windows 10, na kterém běží řídicí SW. Operátor jeho prostřednictvím může zapínat a vypínat vesty, nastavovat jména hráčů, přiřazovat je do týmů a zvolit typ hry. Po dokončení hry umožňuje SW vytisknout výsledky. V počítači je WiFi karta pro komunikaci s vestami.

1.4.2 Další systémy

Další systémy používané v České republice jsou systém REVOLUTION of firmy Delta Strike z Nového Zélandu používaný v jedné brněnské aréně a systém Laserforce používaný jednou pražskou arénou, o kterém se dá najít ještě méně informací. Tyto systémy bohužel neprošly bližším zkoumáním autora.

2 OPTOELEKTRONICKÉ SOUČÁSTKY POUŽÍVANÉ PŘI LASER GAME

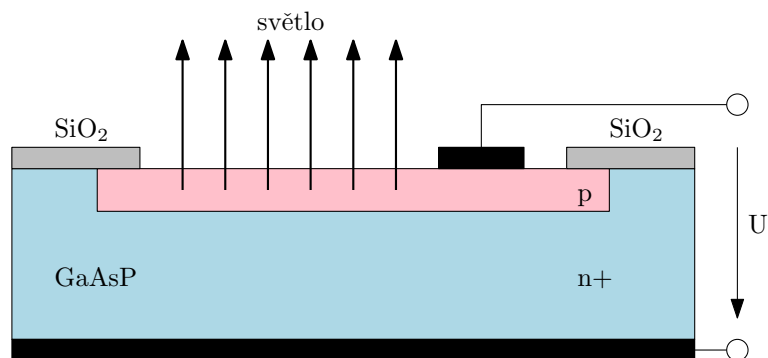
2.1 Optické vysílače

Optické vysílače obdobně jako vysílače rádiové slouží k vysílání elektromagnetických vln. Od rádiových vysílačů se odlišují tím, že využívají jinou část elektromagnetického spektra $\lambda \in \langle 10 \text{ nm} ; 1 \text{ mm} \rangle$, tedy od infračerveného záření, přes viditelné světlo až po záření ultra fialové. Vysílače můžeme rozdělit do dvou skupin a to vysílače založené na LED a laseru.

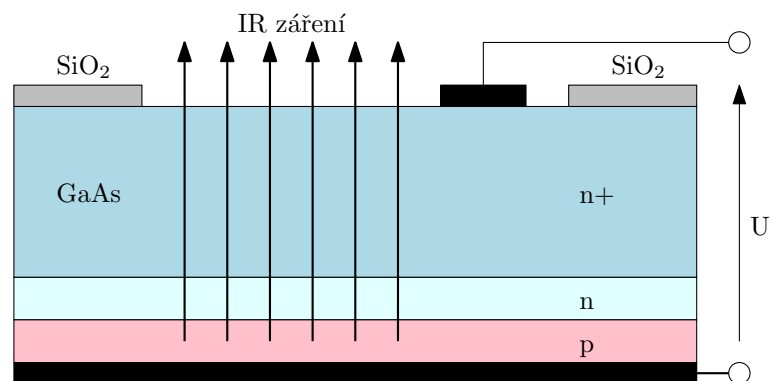
LED

Luminiscenční diody jsou polovodičové součástky s jedním PN přechodem. Na rozdíl od klasických diod nemají LED obě vrstvy PN přechodu stejně dotované. Polovodič N je mnohem více dotován, navíc má mnohem větší objem než polovodič P. Díky tomu, pokud diodou prochází proud, převažuje přesun nosičů z oblasti N do oblasti P, kde rekombinují a uvolněná energie je přeměněna na světelné záření a tepelnou energii. Vrstva P je tenká, aby nedocházelo k velkým ztrátám při šíření světla z polovodiče do okolního prostředí. Vlnová délka vyzařovaného světla je dána použitým základním materiálem. Pokud známe vlnovou délku, je možné spočítat potřebnou energii, kterou je nutno elektronům udělit, aby LED svítila.

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$



Obr. 2.1: Technologické provedení LED pro viditelné světlo



Obr. 2.2: Technologické provedení IR LED

IR LED jsou konstrukčně řešeny jinak. Využívá se toho, že IR záření není polovodičem tlumeno tolik jako viditelné světlo. Díky tomu mohla být oblast vzniku záření umístěna do spodní části substrátu. To má velkou výhodu, protože se může snáze odvádět teplo vznikající při rekombinaci. Díky tomu mohou IR LED vyzařovat mnohem větší výkon než diody vyzařující viditelné světlo. Proto nalézají uplatnění jako optické vysílače, zejména na delší vzdálenosti. Základním materiálem pro výrobu IR LED je arsenid gallia. Vyráběné diody dosahují vlnových délek $\lambda \in \langle 830 \text{ nm} ; 1040 \text{ nm} \rangle$.

Laserové diody

Laserová dioda je polovodičová součástka, která se při malém proudu v propustném směru chová jako klasická luminiscenční dioda. Proud způsobí spontánní emisi, což znamená, že k emisi dochází náhodně v libovolný čas, čímž dioda vyzařuje světelné záření. Při zvýšení proudu diodou přechází dioda do laserového režimu. V tomto režimu je vyzařované světlo koherentní, tedy má konstantní frekvenci a fázi. To nastane díky optické rezonanci v polovodičovém krystalu a následné vynucené emisi.



Obr. 2.3: Dvojitá heterogenní struktura polovodičového laseru

Emitované fotony se odráží od zrcadla a polopropustného zrcadla. Krystal se chová jako dutinový rezonátor. Šířka a výška přechodu udává vid vznikajícího stojatého vlnění. Když intenzita vlnění překročí určitou mez, je vyzářena skrz polopropustné zrcadlo do okolí.

Laserové diody nalézají uplatnění tam, kde je třeba vyzářit velký optický výkon. Vzhledem k tomu, že v laserovém režimu se diody nachází až od vyššího proudu, tak vyžadují dobré chlazení, aby nedošlo k jejich poškození.

2.2 Optické přijímače

Optický přijímač nebo-li detektor či čidlo je elektrotechnická součástka, která převádí elektromagnetické vlnění o vlnových délkách $\lambda \in \langle 1 \mu\text{m}; 100 \text{ nm} \rangle$ na elektrickou veličinu, nejčastěji napětí nebo proud.

2.2.1 Fotodioda

Fotodioda je polovodičová součástka, založená na fotoelektrickém jevu, která je navržena pro detekování záření. Převádí dopadající elektromagnetické vlny na elektrický proud. Konstrukčně se podobá LED. Fotodiody se mohou rozdělit na dvě skupiny a to na PN fotodiody a PIN fotodiody.

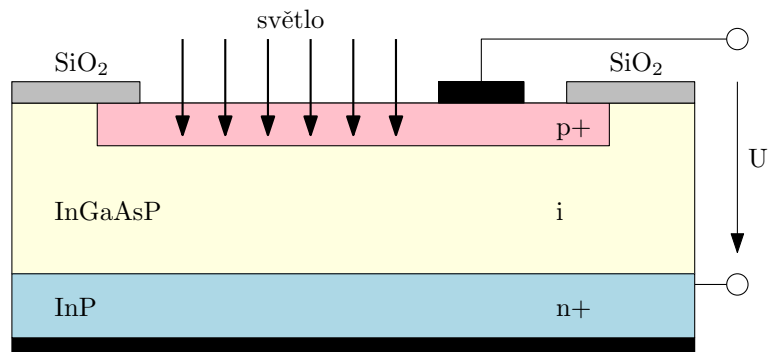
Dopadne-li na oblast PN přechodu foton s dostatečnou energií, uvolní z depletiční oblasti jeden pár díra-elektron. Pokud není k diodě přiloženo vnější napětí, je v depletiční oblasti difuzní napětí. Díky difuznímu napětí je elektron urychlen do oblasti N a díra do oblasti P, tím vzniká driftový proud (proud v závěrném směru).

Pokud dopadne foton mimo vyprázdněnou oblast PN přechodu, udělí elektronu energii, díky které se elektron uvolní z valenční vrstvy a stane se volným nosičem náboje. Teprve poté co se elektron dostane do depletiční oblasti, může být urychlen difuzním napětím a tím vznikne difuzní proud. Tento děj je mnohem pomalejší, než pokud foton dopadne přímo do depletiční oblasti.

PN diody nemají moc velkou oblast prostorového náboje, většina záření dopadá mimo oblast prostorového náboje. A elektronům trvá déle, než se dostanou do oblasti prostorového náboje, který je urychlí, aby vytvořily elektrický proud. Díky tomu nejsou vhodné pro detekci rychlých signálů, ale jejich výhodou je díky jejich nízké citlivosti nízká šumovost.

PIN diody jsou oproti PN diodám mnohem rychlejší, mají velkou oblast prostorového náboje a téměř všechny dopadající fotony s dostatečnou energií uvolní elektron, který je urychlen difuzním napětím a vytvoří záporný driftový proud. Od PN diod se liší tím, že mezi vrstvou N a P mají vrstvu čistého polovodiče s vlastní

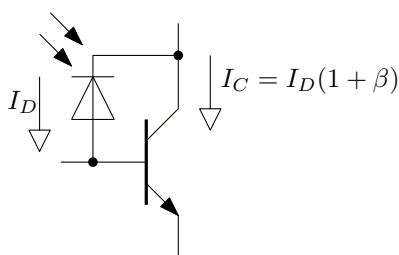
vodivosti označovanou jako I. Tato vrstva se neuplatňuje při průchodu stejnosměrného proudu, dioda se chová jako běžná PN dioda. Při vyšších frekvencích nosiče náboje z vrstvy I nestihnou být odsáti. Díky tomu má vrstva I lineární odpor daný protékajícím stejnosměrným proudem.



Obr. 2.4: Struktura PIN diody

2.2.2 Fototranzistor

Fototranzistor se může modelovat jako fotodiody s tranzistorem jako zesilovačem fotonového proudu. Díky zesílení signálu je schopen detekovat i nižší intenzitu záření. Jeho nevýhodou je, že má β větší parazitní kapacitu (β je proudový zesilovací činitel), která omezuje jeho mezní frekvenci. Proto není vhodný pro měření rychlých signálů.



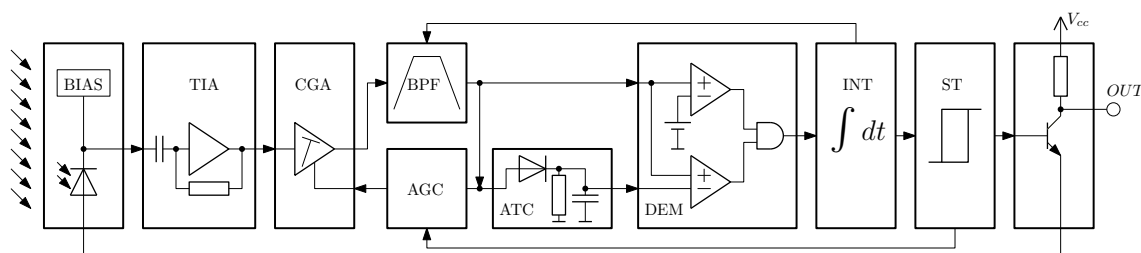
Obr. 2.5: Náhradní schéma fototranzistoru

U reálného fototranzistoru, dopadají fotony přímo do oblasti báze, není tedy realizovaný fotodiodou s klasickým tranzistorem.

2.2.3 Integrované přijímače

Integrované optické přijímače mají na jednom čipu kromě fotodiody integrovanou i další elektroniku. Zpravidla obsahují vstupní zesilovač, pásmovou propust, demodu-

látor a výstupní zesilovač.



Obr. 2.6: Blokové schéma integrovaného přijímače OSRB38C9BA

Konkrétněji bude popsán výše uvedený přijímač. Záření v okolí vlnové délky 940 μm je detekováno fotodiodou a pomocí trans-impedančního zesilovače (TIA) je přivedeno do přijímače. TIA funguje jako napěťový sledovač, který má velký vstupní odpor a malý výstupní odpor. Je tu proto, aby se odebíraným výkonem nezatežovala fotodioda.

S TIA je signál přiváděn do zesilovače s nastavitelným zesílením (CGA). Po zesílení je z CGA přiveden na pásmovou propust (BPF) se středním kmitočtem 37,9 kHz. Ta slouží k odfiltrování rušivých frekvenčních složek před demodulací, aby nevznikaly parazitní intermodulační produkty.

Po vyfiltrování se signál rozdělí do dvou větví. První větev jde přímo do demodulátoru. Druhá větev slouží jako jedna ze zpětných vazeb pro CGA. Kromě toho, že druhá větev tvoří zpětnou vazbu, vede i do automatického nastavování prahového napětí (ACT) pro druhý komparátor v demodulátoru. Pokud má signál dostatečnou amplitudu, projde diodou a nabije kondenzátor.

Demodulace probíhá tak, že pokud signál, který vychází s BPF má vyšší amplitudu, než je komparační napětí některého z komparátorů, tak komparátor sepne. Aby byl výstup demodulátoru v logické jedničce, tak musí být sepnuté oba dva komparátory, protože jejich výstupy jsou na hradlo AND, které je výstupem demodulace. Tedy vstupní signál musí mít větší amplitudu, než je pevně dané předpětí prvního komparátoru a větší amplitudu než je komparační napětí druhého komparátoru, které je nastavováno z výstupu BPF.

Integrátor vyhlazuje výstupní signál za cenu toho, že signál ztratí ostré hrany.

Výstup integrátoru je přiveden na vstup Schmittova klopného obvodu, který z integrovaného signálu vytvoří opět ostrý obdélníkový signál. Výstup ze Schmittova komparátoru je další zpětnou vazbu pro CGA a také řídí výstupní tranzistor.

3 ZABEZPEČENÍ DAT PROTI CHYBÁM

Při přenosu dat může dojít k jejich poškození. Abychom mohli ověřit korektnost přicházejících informací, tak je třeba zavést bezpečnostní prostředky, které nám umožní odhalení chyb. Mezi tyto bezpečnostní prostředky patří i zabezpečovací kódy, kterými se bude práce v této kapitole zabývat.

3.1 Parita

Parita je velmi jednoduchou cestou k zabezpečení dat. Ke každému slovu přenášených dat se přidá jeden redundantní bit označovaný jako paritní, jehož hodnota zrcadlí celkový počet jedniček. Paritu rozlišujeme na sudou a lichou. Nevýhodou parity je, že nedokáže odhalit několikanásobnou chybu.

Sudá parita Paritní bit je nastaven tak, aby celkový počet jedniček v datovém slově včetně bitu paritního byl sudý. Můžeme ho spočítat jako exkluzivní součet všech bitů datového slova.

$$P_{sudá} = b_0 \oplus b_1 \oplus \dots \oplus b_n$$

datové slovo								parita
b_7	b_6	b_5	b_4	b_3	b_2	b_1	b_0	$P_{sudá}$
0	0	1	0	1	0	1	0	1

Obr. 3.1: Ukázka sudé parity

Lichá parita Paritní bit je nastaven tak, aby celkový počet jedniček v datovém slově včetně bitu paritního byl lichý. Můžeme ho spočítat obdobně jako sudý paritní bit, jen výsledek je třeba znegovat.

$$P_{lichá} = \overline{b_0 \oplus b_1 \oplus \dots \oplus b_n}$$

datové slovo								parita
b_7	b_6	b_5	b_4	b_3	b_2	b_1	b_0	$P_{lichá}$
0	0	1	0	1	0	1	0	0

Obr. 3.2: Ukázka liché parity

3.2 Cyklický redundantní součet

Používá se ke kontrole, zda-li máme nepoškozená data. Na konec přenášených dat se přidá několik redundantních bitů spočítaných pomocí speciální hašovací funkce cyklický redundantní součet – Cyclic Redundancy Check (CRC). Po přijetí dat se může znovu spočítat CRC pro přijatá data, které porovnáme z CRC, které jsme přijali. Pokud budou kontrolní součty shodné, tak jsou i přijatá data v pořádku. Další možností je spočítat CRC pro celá přijatá data včetně kontrolního součtu, pokud jsou přijatá data nepoškozená, dostaneme bitový vektor plný nul.

Pravděpodobnost detekce chyby pomocí CRC, n je délka generačního polynomu:

$$P(n) = 1 - 2^{-n}$$

Čím více bitové CRC pro kontrolu dat zvolíme, tím je větší pravděpodobnost odhalení chyby. Nejčastěji se používají CRC o počtu bitů $8 \cdot 2^n$, kde $n \in \langle 0; 3 \rangle$, ovšem je možné se setkat i s CRC o jiných délkách, dokonce i s takovými, jejichž binární logaritmus délky je necelé číslo.

3.2.1 Generační polynom

Generační polynom je bitový vektor, který by měl pokrývat nejčastější chyby, které se v našich datech objevují. Tento polynom je individuální pro každé přenosové nebo úložné médium. Vytvoření vhodného generačního polynomu je založené na shromažďování statistických údajů o přenášených datech. Na místech slova, kde je největší pravděpodobnost výskytu chyby, se vloží jednička, tím je generační polynom vytvořen. Tento proces je ale velmi zdoluhavý a tak je jeho alternativou použít polynom již vytvořený jiným člověkem, několik polynomů pro různá přenosová média, jsou dostupné v [3].

3.2.2 Ukázka výpočtu kontrolního součtu

Ukázka čtyřbitového CRC pro znak *, který je reprezentován v ASCII kódování dekadickou hodnotou $(42)_{10}$, tedy $(00101010)_2$. S generačním polynomem $x^2 + 1$, který odpovídá bitovému vektoru $(101)_2$. Pro přehlednost udělám mezi jednotlivými nibbly mezeru a CRC oddělím velkou mezerou.

Data zprava doplníme čtyřmi nulami, tedy počtem nul, který odpovídá zvolené velikosti kontrolního součtu.

$$(0010\ 1010\ \ 0000)_2$$

Generační polynom přesuneme tak, aby jeho první jednička (zleva) byla na stejné pozici jako je první jednička dat (také zleva).

$$(0010\ 1000\ 0000)_2$$

Mezi daty a generačním polynomem provedeme exkluzivní součet.

$$\begin{array}{r} (0010\ 1010\ 0000)_2 \\ \oplus (0010\ 1000\ 0000)_2 \\ \hline (0000\ 0010\ 0000)_2 \end{array}$$

Generační polynom posunujeme doprava, dokud se opět nepřekrývají jedničky a uděláme exkluzivní součet s předchozím výsledkem. Tento proces opakujeme, dokud na pozici dat nejsou samé nuly.

$$\begin{array}{r} (0000\ 0010\ 0000)_2 \\ \oplus (0000\ 0010\ 1000)_2 \\ \hline (0000\ 0000\ 1000)_2 \end{array}$$

Vynulování jedniček na pozici dat dosáhneme hned při druhém opakování. Výsledkem kontrolního součtu je tedy bitový vektor $(1000)_2$.

Ten teď přidáme za data reprezentující znak *. Pro ověření správnosti spočítáme kontrolní součet s tím rozdílem, že už nebudeme přidávat za data další čtyři nulové bity. Pokud nám vyjde aplikováním výše popsaného algoritmu nula, tak jsme postupovali správně.

$$\begin{array}{r} (0010\ 1010\ 1000)_2 \\ \oplus (0010\ 1000\ 0000)_2 \\ \hline (0000\ 0010\ 1000)_2 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} (0000\ 0010\ 1000)_2 \\ \oplus (0000\ 0010\ 1000)_2 \\ \hline (0000\ 0000\ 0000)_2 \end{array}$$

Dvěma iteracemi algoritmu jsme dostali kýžený výsledek, takže data jsou v pořádku.

3.2.3 Výpočet CRC pole bajtů

Při přenosu pole bajtů nastává problém, jakým způsobem pro ně efektivně počítat kontrolní součet. Využíván je algoritmus převzatý z [3].

```

1 uint32_t CRC32::calculate(CircularBuffer *buffer, uint16_t start,
   uint16_t size)
2 {
3     uint32_t crc = ~0;
4     uint16_t index, i;
5     for (i = 0, index = start; i < size; i++, index++)
6         crc = _table[(crc ^ buffer->read(index)) & 0xFF] ^ (crc >> 8);
7     return ~crc;
8 }

```

1. Na začátku algoritmu přiřadíme do proměnné *crc* vektor 32 jedniček.
2. Poté každým bajtem dat modifikujeme hodnotu proměnné *crc*. Modifikace proměnné *crc* spočívá v provedení exkluzivního součtu *crc* s aktuálně zpracovávaným bajtem dat a následného maskování výsledku pomocí bitového součinu s číslem 255. Touto operací vytvoříme číslo $\in \langle 0; 255 \rangle$, tedy 1 B.
3. Pro takto upravený bajt je spočítán kontrolní součet.
4. Provedeme exkluzivní součet mezi výsledkem 3. bodu a proměnnou *crc* bitově posunutou o osm míst doprava.
5. Výsledek 4. bodu uložíme do proměnné *crc*.
6. Opakujeme od 2. bodu dokud neprojdeme všechny datové bajty.
7. Nakonec znegujeme hodnotu proměnné *crc* ve které bude výsledek kontrolního součtu.

Výpočet kontrolního součtu je možné zrychlit. Vzhledem k tomu, že probíhá nad známou množinou dat, stačí předem vypočítat tabulku kontrolních součtů pro hodnoty $\in \langle 0; 256 \rangle$ a poté místo výpočtu jen přistupovat na daný řádek tabulky.

4 NÁVRH SYSTÉMU PRO INFRAČERVENÝ PŘENOS DAT

LG je založeno na optickém přenosu dat ze zbraně do vesty. Tato data jsou naprosto klíčová, nesou v sobě informace o tom, kdo je vyslal, a chyba při přenosu nebo interpretaci těchto dat by mohla mít fatální vliv na stav hry. V krajním případě by mohla způsobit přičtení bodů špatnému hráči, což by při kumulaci způsobilo naprostou degradaci hry. Proto je potřeba se problematikou optického přenosu dat zabývat pečlivě.

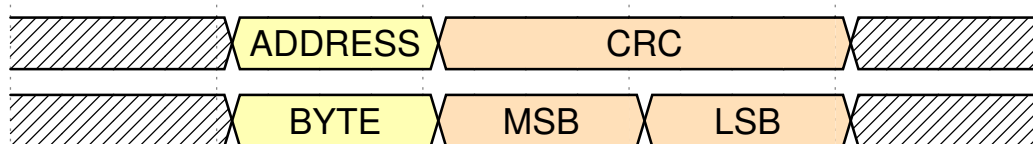
Při LG jsou data přenášena v infračerveném pásmu elektromagnetických vln, což odpovídá vlnovým délkám $\lambda \in \langle 760 \text{ nm}; 1 \text{ mm} \rangle$. Tyto vlnové délky jsou pro lidské oko nedetekovatelné, což je podstatné k zachování smyslu a atmosféry hry.

4.1 Požadavky na systém

Systém musí být schopen vyslat po stisknutí spouště informace o tom, kdo vystřelil. Tuto informaci musí být také schopen přijmout, dekodovat a rozhodnout, jestli jsou data v pořádku, či přišla poškozená. Data by měla být schopna adresovat minimálně 12 hráčů a čas od výstřelu do vyhodnocení dat by měl být minimalizován (např. kvůli možné pokračující hře virtuálně mrtvého hráče.).

4.2 Návrh přenášeného rámce

Bylo rozhodnuto použít osm bitů pro adresu a šestnáct bitů pro kontrolní součet. Takto vytvořený adresovací prostor pokryje všechny hráče s dostatečnou rezervou pro možné rozšíření systému o interaktivní překážky. Hráči budou adresováni od nuly do n , kde $n = \text{počet}_{\text{hráčů}} - 1$.



Obr. 4.1: Obrázek struktury rámce

4.3 Výběr IR vysílače

IR vysílač má za úkol v relativně širokém rozsahu vzdáleností (přibližně 1 až 15 metrů, což odpovídá vzdálenostem, na které jsou od sebe hráči v laser game arénách vzdáleni) osvětlit zásahové čidlo a předat mu informaci o tom, kdo jej zasáhl.

Z dostupných součástek na trhu byl hledán kompromis mezi cenou, výkonem a vyzařovacím úhlem.

IR lasery se při laser game příliš často nepoužívají, protože jejich paprsek je velmi úzký a nevytvořil by se kužel o dostatečném průměru, který by zasáhl hráče. Laser by se musel doplnit dodatečnou optikou, což by vyžadovalo další náklady. Proto se pro přenos dat využívají IR LED. U těchto diod je třeba vyřešit problém zcela opačný - výběr LED s dostatečně malým vyzařovacím úhlem.

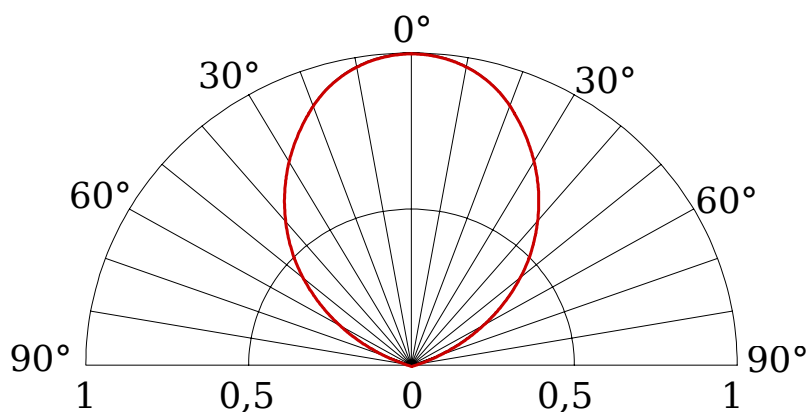
Při experimentech s IR LED s různými vyzařovacími úhly se mi pro tento účel jevily jako ideální diody s vyzařovacím úhlem 12° , vložené do 10cm trubičky. Diody s menším vyzařovacím úhlem byly problematické při kratších vzdálenostech, protože vyzařovaný kužel byl příliš malý.

Důležitým parametrem IR LED je vlnová délka vyzařovaného záření - volba závisí na použitém přijímači. Pokud by měly vysílače s přijímačem rozdílnou vlnovou délku, nastával by útlum přenášeného signálu. Vybrána byla nejrozšířenější vlnová délka 940 nm.

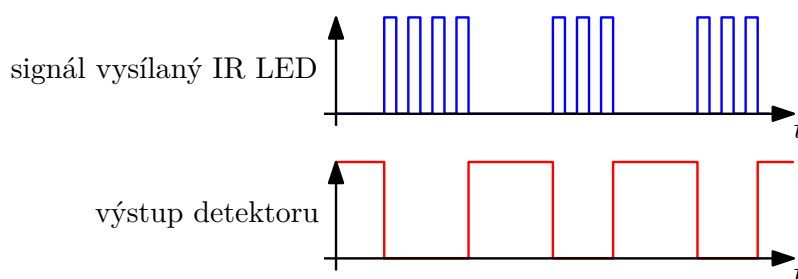
4.4 Výběr IR přijímače

IR přijímač má za úkol detekovat IR záření vysílané vysílačem. Vzhledem k tomu, že přijímače jsou integrované přímo ve vestě, je důležitým kritériem jejich velikost. Integrované přijímače jsou pro tento účel ideální - mají v sobě integrovanou fotodiodu, vstupní transimpedanční zesilovač, pásmovou propust, demodulátor i zesilovač, který má nastavitelné zesílení a snaží se udržet amplitudu výstupního signálu stabilní. A navíc, většina těchto zesilovačů má výstup typu otevřený kolektor, takže lze snímače spojit bez nutnosti použití dalších součástek.

Důležitým parametrem je snímací úhel, v případě snímačů by bylo ideální, kdyby snímaly záření dopadající i pod úhlem 90° stejně citlivě jako záření dopadající na snímač přímo pod nulovým úhlem. Takové snímače ale nejsou dostupné - snímače, které jsou na trhu, mají nejčastěji přijímací úhel 45° , pro použití při laser game to je ale málo. Ve výsledku byl nalezen přijímač OSRB38C9BA s úhlem 90° a vlnovou délkou 940 nm.



Obr. 4.2: Směrová charakteristika OSRB38C9BA, převzato z [11]



Obr. 4.3: Ukázka funkce ideálního integrovaného detektoru

Tento přijímač očekává signál modulovaný na nosný signál 37,9 kHz. Podstatnou vlastností přijímače je tolerance výstupního signálu $\pm 200 \mu\text{s}$ na vstupní testovací puls o šířce $600 \mu\text{s}$. S tím je třeba počítat při návrhu komunikačního protokolu.

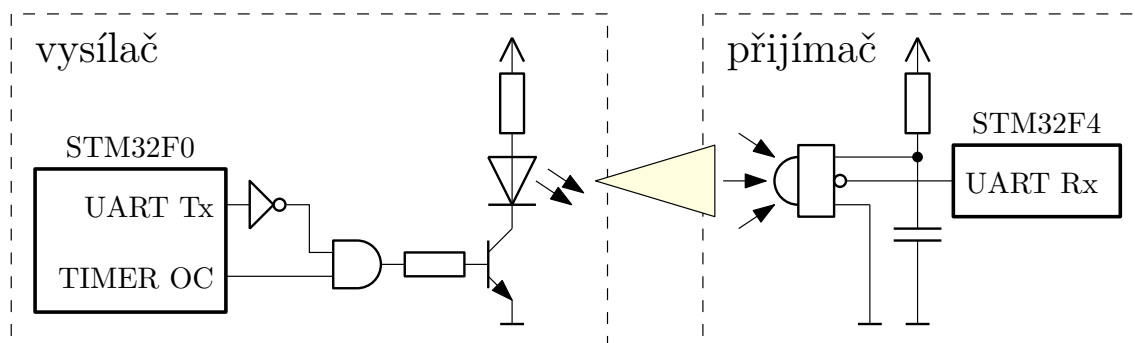
4.5 Přenos IR signálu

IR signál je přenášen od vysílače vzduchem k přijímači. IR signál má vlastnost, že se dobře odráží od bílých stěn, to lze pozorovat například na dálkových ovladačích ke spotřební elektronice, které fungují na stejných principech, pokud ovladač namíříme na bílý strop, IR záření se od něj odrazí a dostane se až k detektoru spotřebiče. Proto jsou stěny v LG arénách tmavé, aby záření pohlcovaly.

Přenášený IR signál musí být modulovaný na nosnou vlnu. Pokud by nebyl modulovaný, stačilo by na detektor jen posvítit, například ze zářivky, a detektor by toto záření interpretoval jako náš požadovaný signál, přestože by se jednalo o rušení. Bohužel, namodulování signálu na nosnou vlnu nezabrání veškerému rušení proniknout do systému, navíc existují i LED osvětlení, jejichž budiče pracují právě na frekvenci

odpovídající nosné frekvence systému vest, čímž osvětlení kompletně zahltí komunikační kanál rušením. Proto je důležité v aréně používat kvalitní světelné zdroje s měniči pracujícími na odlišných-vyšších frekvencích.

4.6 První návrh systému IR přenosu dat



Obr. 4.4: Zjednodušené schéma první verze systému pro IR přenos dat

4.6.1 Vysílač

Vysílač je založen na modulování UART na PWM, které generuje mikrokontrolér. Frekvence PWM je nakonfigurována na hodnotu 37,9 kHz, protože na ni má IR detektor největší zisk. Změna střídy nastavuje dosvit vysílače.

Protože UART má klidový stav v logickém stavu 1, je invertován pomocí hradla negace a s pomocí hradla AND namodulován na PWM. Kdyby nebyl invertován, vysílací LED by většinu času strávila vysíláním, což by zbytečně zvýšilo spotřebu a navíc by mohlo dojít k zahlcení detektoru.

4.6.2 Přijímač

Přijímač k dekódování přijatého signálu využívá UART integrovaný v mikrokontroléru. Klidový stav detektoru je díky integrovanému pull-up odporu v logické jedničce, pokud detekuje signál, je výstup stažen do logické nuly. Tohle chování detektoru je pro systém vhodné, protože vysíláme pouze nulové bity. Detektor je opatřen RC článkem, aby do něj nevnikalo rušení z napájecího vedení.

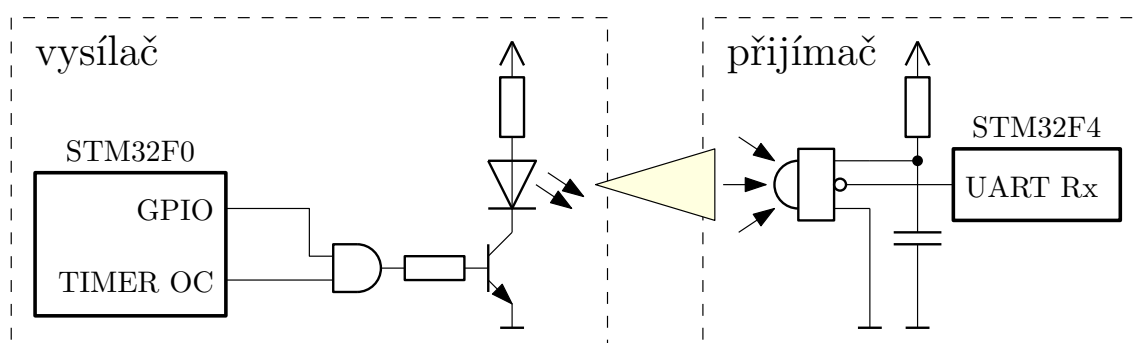
UART byl nastaven na přenosovou rychlost 2400 bps. Jeden bit trvá přibližně 416 μ s. Perioda jednoho PWM pulzu je 23 μ s, tedy na jeden bit připadá 16 PWM pulzů. Vzhledem k toleranci detektoru je patrná příčina vzníkání chyb při zahlcení, zkrátka přenosová rychlost je na použitý detektor příliš vysoká. Experimentálně byla vyzkoušena i nejnižší standardní přenosová rychlost 1200 bps - jeden bit tedy

trval 832 μ s. Ale stále při posílání dat s velkým počtem nul docházelo velmi často k chybám - bylo možné ještě snižovat přenosovou rychlost, ale zahlcování detektoru by tím nebylo sníženo - proto bylo rozhodnuto o navrhnutí vlastního komunikačního protokolu.

4.6.3 Zhodnocení systému

Tato koncepce přenosu není příliš spolehlivá. Pokud se vysílají data, která obsahují velké množství nul, po několika paketech dojde k zahlcení detektoru. To se projevuje tak, že se projeví tolerance detektoru ± 200 μ s, která deformuje přijímaný signál. UART tyto data poté dekóduje s velkou chybovostí. Díky CRC kontrole se sice vyhodnotí, že data jsou chybná, tudíž nedojde k usmrcení zasaženého hráče a přičtení bodů špatnému hráči, ale pokud hráč protihráče zasáhl a on přesto žije, degraduje to hru. Pokud se přeruší část rámce (poslední byte) při přenosu, UART tuto chybu neodhalí a od přerušení spojení nabude zbytek bitů hodnotu jedna.

4.7 Druhý návrh systému IR přenosu dat



Obr. 4.5: Zjednodušené schéma druhé verze systému pro IR přenos dat

Tento systém vznikl jako náhrada systému předchozího. Je navržen tak, aby odolával problémům se shluky nul a korektně dekodoval data i při jejich deformaci o ± 200 μ s.

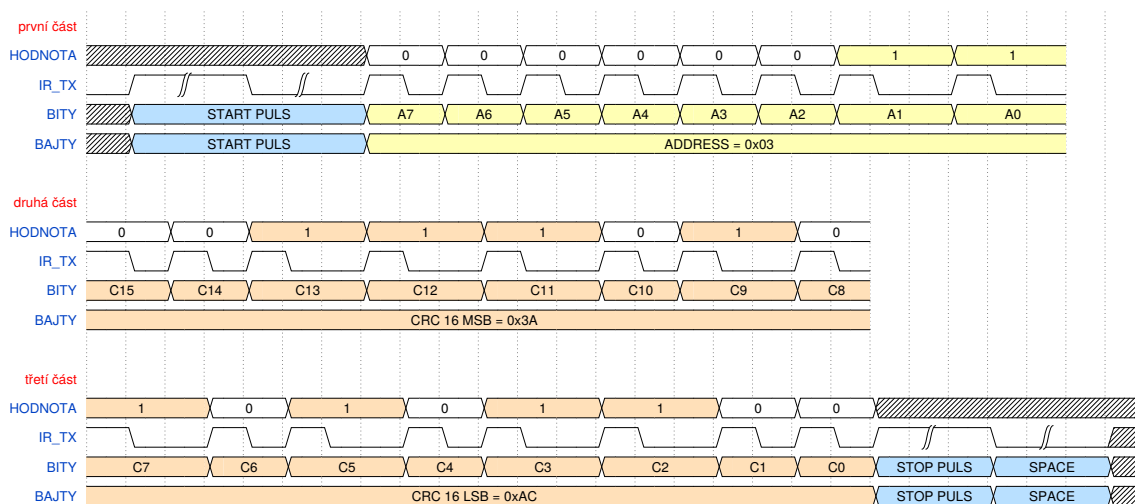
Systém už není založen na modulování protokolu UART na PWM signál. Byl inspirován komunikačními protokoly dálkových ovladačů, které jsou robustní a spolehlivé. Pro přenos byl navrhnut vlastní komunikační protokol - jak logická jednička, tak nula jsou reprezentovány pulzem a charakteristickou mezerou, takže pokud dojde ke ztrátě části rámce, problém je odhalen, protože dojde k porušení podmínek komunikačního protokolu.

4.7.1 Komunikační protokol

Komunikace začíná odesláním startovacího impulsu, poté následuje startovací mezera. Po této sekvenci následuje 24 period začínajících vždy datovým pulsem, který má pevnou délku, následovaným mezerou, která definuje zda-li se přenáší logická jednička či nula. Po dokončení posílání datových bitů následuje ukončovací pulz. Jednotlivé rámce jsou od sebe navíc odděleny mezerou, která má definovanou minimální délku. Při vyhodnocování se počítá s tolerancí $\pm 250 \mu s$, což s rezervou pokryje toleranci optického přijímače.

Tab. 4.1: Definice časování komunikačního protokolu

název	čas [μs]
IR_TIM_START_PULS	5000
IR_TIM_START_SPACE	5000
IR_TIM_DATA_PULS	600
IR_TIM_DATA0_SPACE	600
IR_TIM_DATA1_SPACE	1200
IR_TIM_END_PULS	3000
IR_TIM_PACKET_SPACE	30000
IR_TIM_TOLERANCE	250



Obr. 4.6: Ukázka jednoho rámce přenášeného IR protokolem

4.7.2 Zhodnocení

Tento protokol je spolehlivý, povedlo se jím opravit všechny nedostatky, kterými trpěla první navržená verze. Navíc došlo ke zjednodušení HW. V přijímači už není potřeba mít hradlo negace - z HW by se mohlo vypustit i hradlo AND a nahradit jej hradlem NAND, které je součástí IRTIM (IR timeru, který vznikne spojením timeru 16 a 17) integrovaným přímo v některých MCU řady STM32F0. Pro vysílač ale byl vybrán MCU, který integrovaným NAND hradlem nedisponuje.

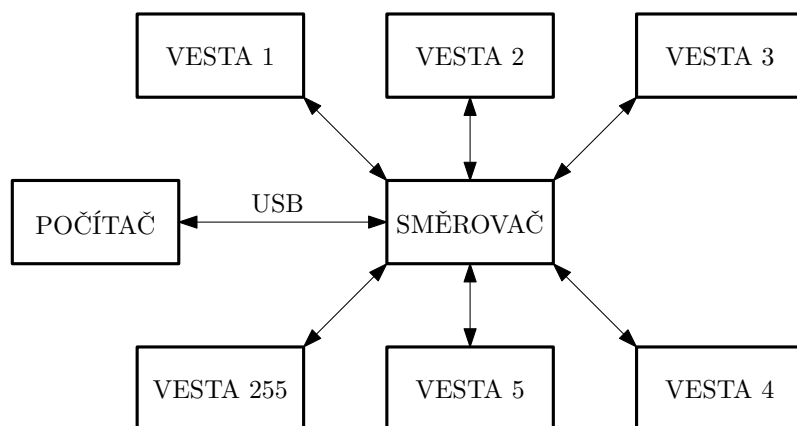
Maximální doba přenosu jednoho rámce (plného logických jedniček), trvá 86,2 ms. Minimální doba přenosu rámce (plného nul) je 71,8 ms, maximální přenosová rychlost je 334 bps a minimální přenosová rychlost je 278 bps. Dosažené přenosové rychlosti jsou sice mnohem nižší než v předchozí verzi, ale vzhledem k přenesenému objemu dat 24 b po stisku spouště, je doba přenosu přijatelná.

Případné navýšení datové propustnosti protokolu by bylo možné pomocí snížení mezery mezi rámci.

5 RÁDIOVÁ KOMUNIKACE

Rádiová komunikace je druhou nejdůležitější funkcí LG vesty. Využívá se k nakonfigurování vest před hrou, a během hry k předávání informací mezi jednotlivými vestami a řídicím počítačem.

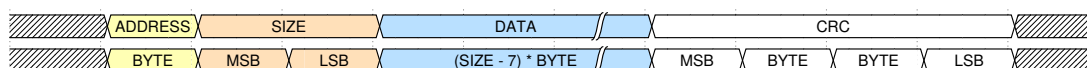
5.1 Topologie sítě



Obr. 5.1: Blokové schéma topologie sítě

Byla použita hvězdicová topologie sítě, v jejímž středu se nachází směrovač, který zprostředkovává komunikaci mezi řídicím počítačem na jedné straně a vestami na straně druhé. Tato topologie je výhodná, protože nedochází ke konfliktům mezi jednotlivými zařízeními. Směrovač uděluje jednotlivým zařízením v síti časová okna, kdy mohou komunikovat. Směrovač je tedy v této síti v roli řídicího prvku a ostatní zařízení jsou pouze řízená. Informace o dostupných zařízeních získá z nastavení hry od řídicího počítače.

5.2 Přenášený rámec



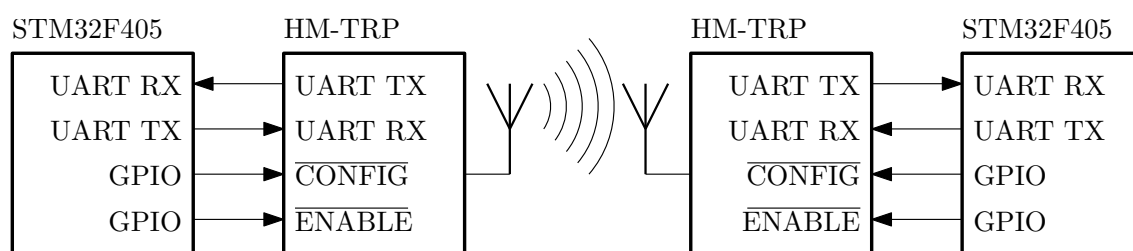
Obr. 5.2: Znáznornění rámce rádiové komunikace

Přenášený rámec má proměnnou délku v závislosti na velikosti přenášených dat. Jelikož je třeba přenášet data o velikosti pár bytů při zjišťování stavů vest, tak i

data o velikosti stovek bytů při konfigurování zařízení. Pro kompletní konfiguraci vesty však zcela postačuje velikost 512 B.

Rámec začíná 8b adresou, která specifikuje příjemce, resp. odesílatele. Následují dva bajty udávající počet bytů v rámci. Poté jsou v rámci umístěna přenášená data. Rámec končí čtyřmi bajty obsahujícími 32 b CRC, které slouží jednak k potvrzení správnosti přenášených dat a také k vyhledávání platných rámců v přijatých datech.

5.3 Praktická realizace



Obr. 5.3: Blokové schéma komunikačního řetězce z moduly HM-TRP

Rádiové rozhraní je postavené na modulech HM-TRP firmy Hope Microelectronics. Moduly mají programovatelnou pracovní frekvenci, systém používá 868 MHz. Dále mají nastavitelný vysílací výkon $\in \langle 1; 20 \rangle$ dBm a přenosovou rychlost $\in \langle 1, 2; 115, 2 \rangle$ kbps. Moduly pracují v poloduplexním módu, tedy v jeden okamžik mohou buďto přijímat nebo vysílat. Dále jsou moduly vybaveny rozhraním UART, umožňujícím snadnou komunikaci s modulem (přijímat a vysílat přenášená data a také modul konfigurovat). Moduly poskytují pouze možnost vysílat a přijímat data, která jsou do něj pomocí UART poslána, avšak negarantují úspěšnost doručení dat na místo určení. Tento problém je třeba řešit na vyšší vrstvě komunikace. Spotřeba modulu je 1 μ A v režimu spánku, 25 mA při příjmu a 100 mA při vysílání maximálním výkonem.

6 NAPÁJECÍ SYSTÉM VESTY

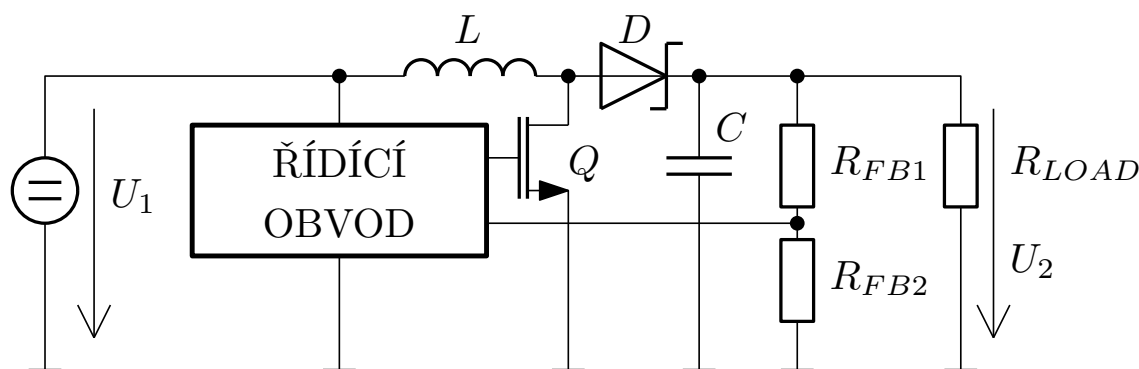
Napájecí systém vesty má za úkol poskytovat elektrický výkon v požadované kvalitě pro správnou funkci dalších obvodů ve vestě.

Primárním zdrojem energie vesty je lithium-polymerový akumulátor 2XLP7836140, s kapacitou 7600 mAh, který by měl zajistit dostatečnou časovou výdrž vesty. Akumulátor je vybaven ochrannými obvody proti přílišnému vybití pod hranici 2,75 V a přebití přes 4,30 V.

Úbytky napětí na modré, zelené LED 3,4 V a úbytky vznikající na spínacích prvcích při regulování jasu LED, dosahují větší hodnoty než je napětí akumulátoru, bylo tedy nutné navrhnout napájecí systém založený na zvyšujícím měniči napětí.

Dalším úkolem napájecího systému je zajistit nabíjení akumulátoru a sledování stavu akumulátoru.

6.1 Zvyšující měnič



Obr. 6.1: Blokové schéma zvyšujícího měniče

Zvyšující měnič, někdy také označovaný jako boost či step up, je elektrický obvod, patřící do kategorie spínaných měničů, které s vysokou účinností transformují vstupní napětí U_1 na vyšší napětí U_2 . Účinnost spínaných měničů dosahuje až 99 %, ztráty jsou způsobeny především přeměnou části transformované elektrické energie v teplo na spínacích prvcích a ohmickém odporu vinutí cívky. Účinnost se dá zvýšit použitím měniče, který místo diody používá tranzistor. Vstupní i výstupní napětí měniče jsou stejnosměrná.

Měnič obsahuje dva akumulační prvky L a C , které slouží k uchování energie a dva prvky aktivní Q a D , které plní funkci spínačů. Rezistor R_{LOAD} představuje zátěž.

Ve chvíli sepnutí tranzistoru začne cívka akumulovat energii - v tento okamžik je dioda uzavřena, protože napětí na anodě má podprahovou hodnotu. Jakmile dojde k uzavření tranzistoru, otevře se dioda a začne přesouvat akumulovanou energii z cívky do kondenzátoru.

Odvození výstupního napětí zvyšujícího měniče pro ideální spínací prvky je následující:

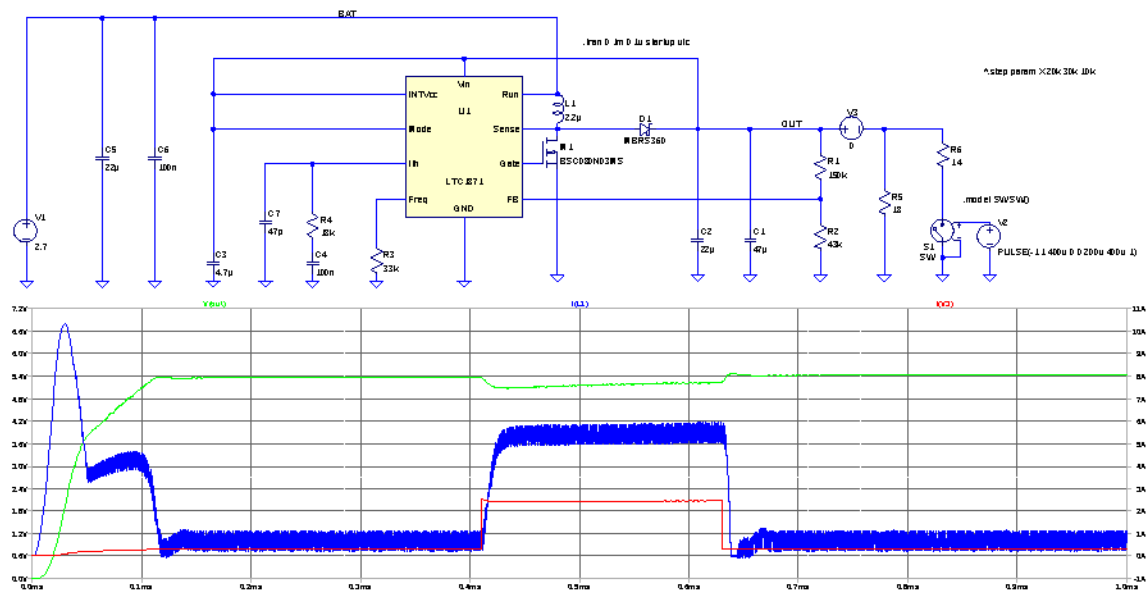
$$\begin{aligned} i_L(t) &= \frac{1}{L} \int u_L(t) dt \Rightarrow u_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} \\ \frac{U_1 \cdot t_{ON}}{L} &= \frac{(U_2 - U_1)t_{OFF}}{L} \Rightarrow U_1 \cdot t_{ON} = (U_2 - U_1)t_{OFF} \\ U_1 \cdot t_{ON} &= U_2 \cdot t_{OFF} - U_1 \cdot t_{OFF} \Rightarrow U_1 \cdot T = U_2 \cdot t_{OFF} \\ U_2 &= U_1 \frac{T}{t_{OFF}} = U_1 \frac{1}{\underline{\underline{1-s}}} \end{aligned}$$

Kde t_{OFF} je čas, po který je tranzistor sepnut, t_{OFF} čas po který je tranzistor rozepnut, T je perioda spínání a s střída spínání.

Ze vztahu lze vyvodit, že platí $U_2 \geq U_1$. Při použití reálných součástek tato rovnost neplatí, jestliže je tranzistor trvale rozepnut, je napětí U_2 menší o úbytek na diodě a cívce. Dále ze vztahu vyplývá, že velikost výstupního napětí je závislá pouze na velikosti vstupního napětí a střídě spínání.

Řídící obvod se snaží udržovat konstantní výstupní napětí pomocí regulování střídě. Výstupní napětí je monitorováno díky zpětné vazbě realizované napětovým děličem. Poměr rezistorů R_{FB1} a R_{RB2} určuje výsledné výstupní napětí.

Pro realizaci zvyšujícího měniče byl vybrán integrovaný obvod firmy Linear Technology LTC1871.

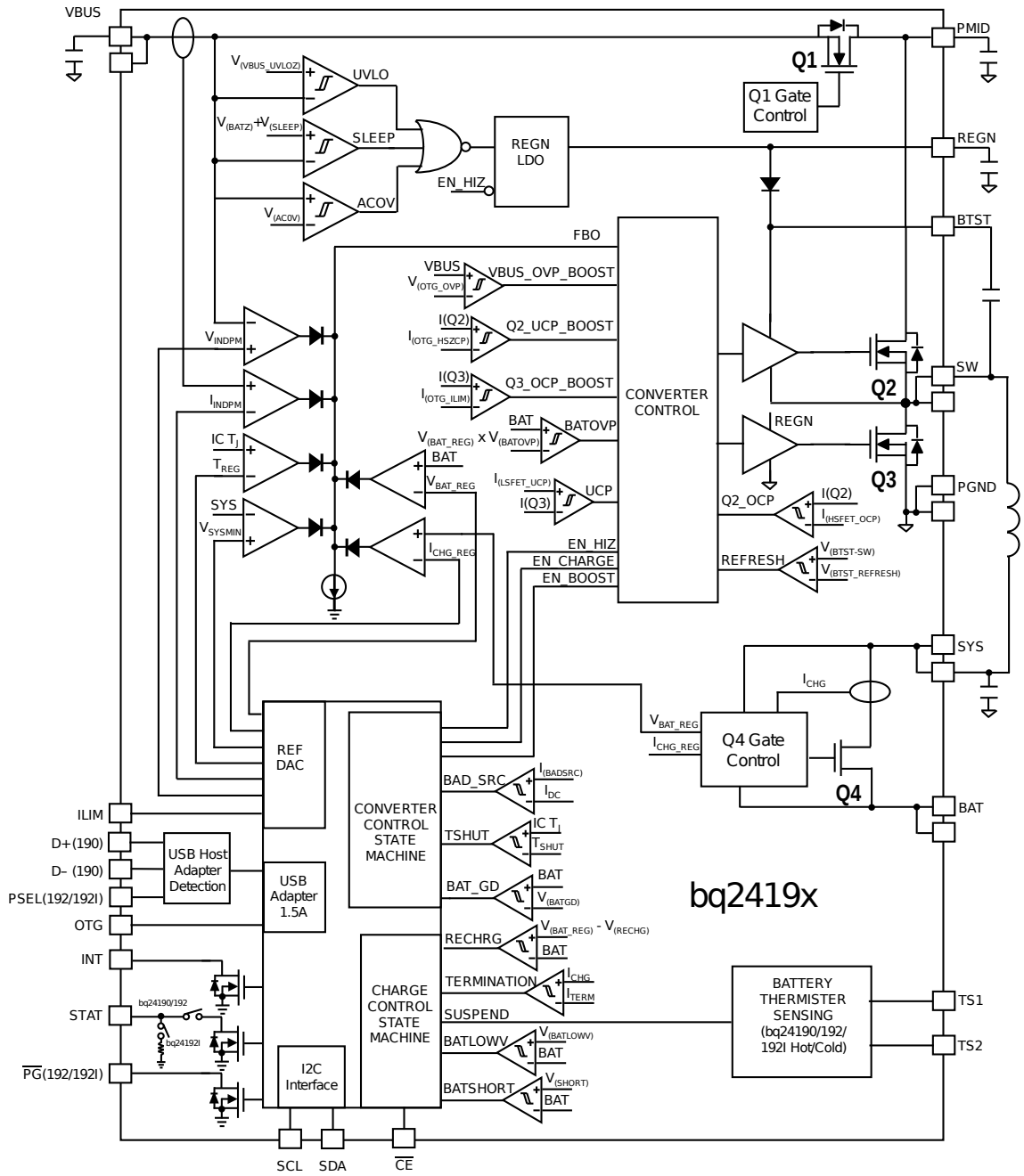


Obr. 6.2: Ověření funkce simulací zvyšujícího měniče v programu LTSpice

6.2 Nabíjecí obvod

Nabíjecí obvod zajišťuje nabíjení akumulátoru z externího zdroje energie. Pro laser game arény je důležité, aby nabíječka byla schopná přes noc (12 hodin času) dobít akumulátory. Vezmeme-li v úvahu kapacitu akumulátoru a čas potřebný pro jeho nabití, zjistíme, že nabíječka musí být schopna nabíjet akumulátor minimálně proudem 633 mA, od čehož se musí odvíjet i výběr nabíjecího obvodu. Nakonec byl vybrán obvod BQ24192 od firmy Texas Instruments.

BQ24192 je určený k nabíjení lithium-iontových a lithium-polymerových akumulátorů. Je založen na snižujícím spínaném měniči, dokáže pracovat od napájecího napětí 3,9 V až 17 V a nabíjet proudem až 4,5 A. Je také schopen monitorovat teplotu článku pomocí termistoru. S okolím komunikuje prostřednictvím I2C sběrnice, která umožňuje nastavovat některé nabíjecí parametry.



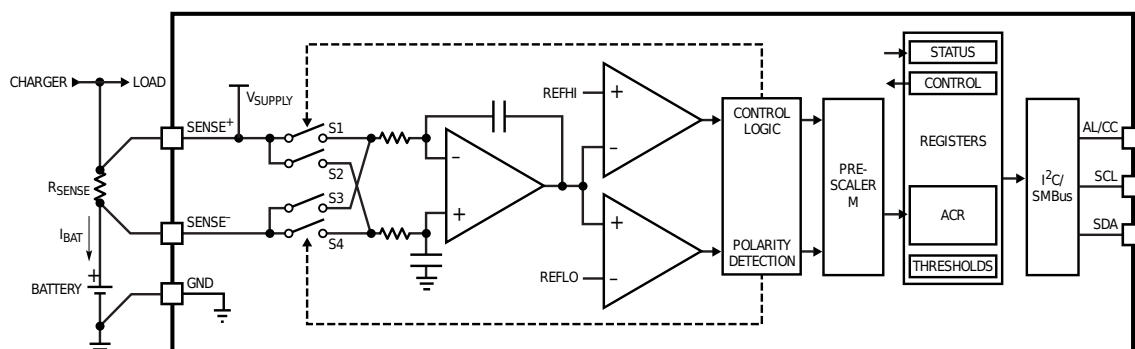
Obr. 6.3: Nabíjecí obvod BQ24192, převzato z [7]

Pinem PSEL se nastaví jestli je obvod napájen z USB (vysoká úroveň) a nebo adaptéru (nízká úroveň). CE povoluje nabíjení, PG signalizuje přítomnost napájecího napětí a STAT signalizuje stav nabíjení (vysoká úroveň signalizuje dokončení nabíjení). Velmi důležitým pinem je ILIM, který slouží k nastavení maximálního nabíjecího proudu pomocí rezistoru R_{ILIM} .

$$I_{INMAX} = \frac{1 \text{ V}}{R_{ILIM}} \cdot 530 = \frac{1}{180} \doteq \underline{\underline{3 \text{ A}}}$$

6.3 Monitorování náboje

Monitorování stavu nabití akumulátoru je důležité zejména pro obsluhu arény, aby nedošlo k nechtěnému vypnutí vesty při aktivní hře. Signalizovat stav akumulátoru lze například i prostým děličem napětí, v případě, kdy by postačovalo rozlišování pouze dvou stavů, jinak analogově digitálním převodníkem. Tyto metody ale mají nevýhodu, že výstupní napětí akumulátoru se může měnit v závislosti na odebíraném proudu a vnitřním odporu akumulátoru. Obsluha pak může být mystifikována z fluktuací napětí a může nesprávně vyhodnotit reálný stav akumulátoru. Proto tyto metody byly zavrženy a stav je vyhodnocován z celkového náboje.



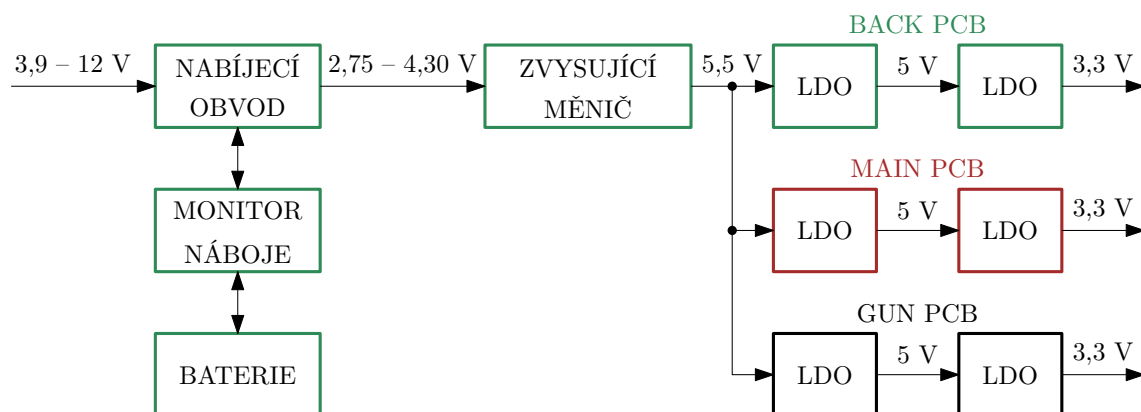
Obr. 6.4: Blokové schéma obvodu LTC2941, převzato z [8]

Použil jsem integrovaný obvod LTC2941 firmy Linear Technology. Tento obvod je stále připojený k akumulátoru přes snímací rezistor malé hodnoty, ze kterého v klidu odebírá proud pod $100\text{ }\mu\text{A}$.

Obvod v pravidelných časových intervalech měří napětí na snímacím rezistoru a z jeho polarity určuje, jestli je akumulátor nabíjen či vybíjen, a z hodnoty napětí a známého času měření dopočítává náboj.

Obvod je vybaven I2C sběrnici, takže je velmi snadné z něj vyčítat informace o náboji v systému.

6.4 Topologie napájecího systému

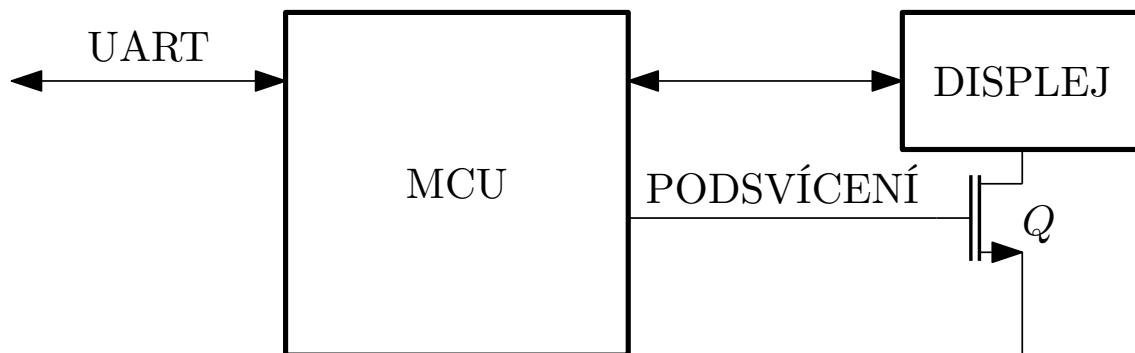


Obr. 6.5: Blokové schéma napájecího systému

Většina bloků napájecího systému se nachází na plošném spoji (PCB) pojmenovaném back, který je umístěn na zádech hráče. Ten obstarává monitorování náboje, nabíjení akumulátoru a zvyšování napětí akumulátoru. Do všech částí vesty je přiváděno napětí $5,5\text{ V}$, které je na výstupu zvyšujícího měniče. Napětí je dále snižováno pomocí nízko-úbytkových stabilizátorů (LDO).

7 ZOBRAZOVACÍ SYSTÉM

Zobrazovací systém slouží výpisi aktuálních událostí hráče. Mezi tyto události patří čas, osobní statistiky hráče či jméno hráče kterého naposledy trefil, nebo kým byl trefen.



Obr. 7.1: Blokové schéma zobrazovacího systému

Zobrazovač je postaven na MCU STM32F042F6P a displeji RC1602. Zobrazovací systém je navržen tak, že s řídicím MCU vesty komunikuje pomocí UART. Je to samostatný modul, díky tomu není problém vyrobit vesty bez zobrazovače, či místo tohoto modulu navrhnout modul jiný. Další výhodou této koncepce je možnost zobrazovaná data rychle uložit do RAM MCU zobrazovače a poté je zapisovat. Jelikož komunikace ze znakovým LCD založeným na řadiči HD44780 je značně pomalá, tak nebude zdržován hlavní MCU vesty. Naopak nevýhodou tohoto řešení je cena jednoho MCU navíc.

Zobrazovač má možnost díky řídicímu tranzistoru ovládat podsvícení zobrazovače a tím snižovat spotřebu zařízení.

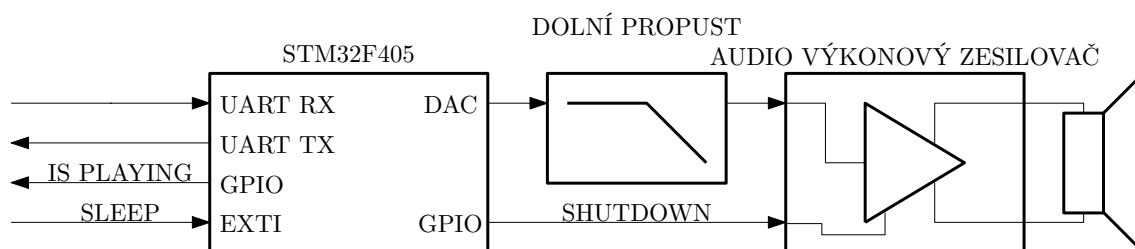
8 GENERÁTOR ZVUKŮ

Zvukový generátor je důležitou součástí LG vesty. Zajišťuje generování zvuků, jejichž stěžejním cílem je informování hráčů o aktuálním dělení v aréně, a také zlepšují výsledný prožitek ze hry.

8.1 Požadavky na generátor

Pro generátor je jedním z nejdůležitějších požadavků jeho paměť alespoň 800 kB, aby se do ní vešly všechny vzorky zvuků i firmware. Možnost jej řídit pomocí jednotky UART a jednoduchá indikace přehrávání a možnost snížit odběr generátoru pomocí GPIO.

8.2 Realizace generátoru



Obr. 8.1: blokové znázornění zvukového generátoru

Generátor je založen na mikroprocesoru STM32F405, který je vybavený 1 MB paměti FLASH, která je využita, z velké části, k uložení vzorků zvuků. Ve zbytku paměti je uložen firmware generátoru. Výše zmíněný mikroprocesor, také obsahuje mimo jiné 12b DAC, až 32b čítače / časovače, DMA, či UART.

Zvuky jsou v paměti reprezentovány vzorky. Tedy polem kvantovaných hodnot snímaných v diskrétních časech, které popisují zvukové vlny.

Pokud chceme obnovit původní signál, je třeba tyto vzorky signálu ve stejných časech převádět pomocí DAC na napětí. K tomu je využita jednotka DMA a časovač. DMA je nakonfigurováno tak, aby přenášelo vzorky vybraného zvuku z paměti FLASH do DAC. Jednotka DAC je přitom spouštěna časovačem, který generuje spouštěcí signál stejnou frekvencí jako byla vzorkovací frekvence zvuků, tedy 16 kHz. Na výstupu mikroprocesoru tedy můžeme pozorovat napětí odpovídající hodnotám vzorků.

Následně je třeba signál obnovit pomocí rekonstrukčního (anti-aliasingového) filtru, tedy filtru typu dolní propust. Ten ze signálu odstraní nežádoucí spektrální složky, které vznikají skoky z hodnoty jednoho vzorku na vzorek druhý. Filtr byl navržen pomocí on-line návrhového prostředí firmy Analog Devices.

Poté je signál zesílen ve výkonovém integrovaném audio zesilovači LM4861 a přiveden do reproduktoru, kde dojde k jeho převodu na akustický signál.

8.3 Komunikační protokol

S generátorem se jednoduše komunikuje pomocí UARTu. Během komunikace se rozlišuje mezi třemi typy příkazů:

- zastavit přehrávání
- změnit zvukovou sadu
- přehrát zvuk z nastavené zvukové sady (skupiny zvuků namluvené stejným jazykem)

Tab. 8.1: Kompletní seznam příkazů zvukového generátoru

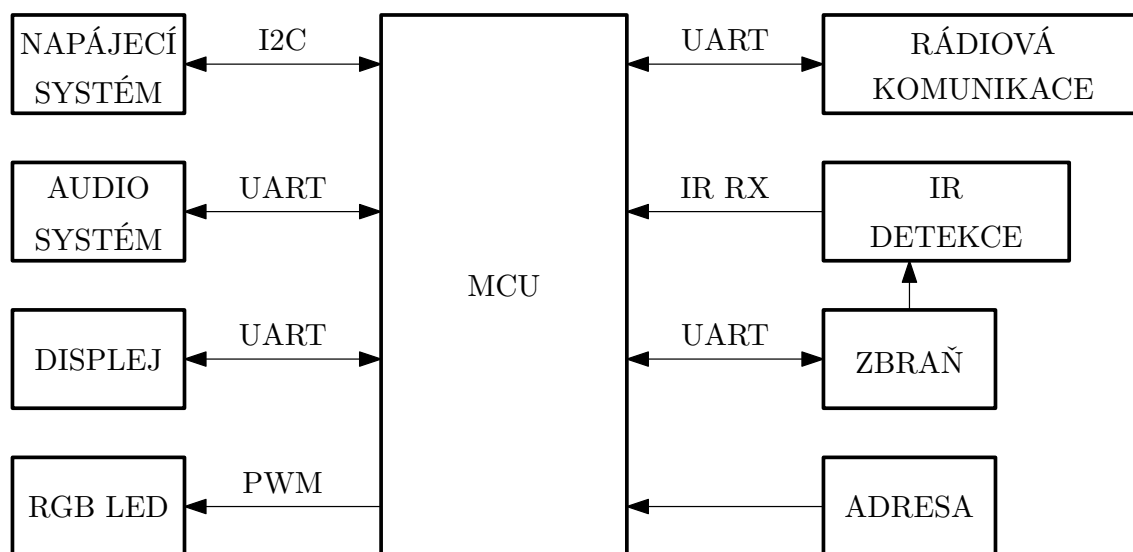
název	kód
SOUND_CMD_STOP	0
SOUND_CMD_SET_SOUND_SET_EN	1
SOUND_CMD_SET_SOUND_SET_CZ	2
SOUND_CMD_PLAY_ACTIVATED	3
SOUND_CMD_PLAY_GUN	4
SOUND_CMD_PLAY_DONT_GIVE_UP	5
SOUND_CMD_PLAY_GAME_OVER	6
SOUND_CMD_PLAY_GO	7
SOUND_CMD_PLAY_KEEP_GOING	8
SOUND_CMD_PLAY_NUMBER_1	9
SOUND_CMD_PLAY_NUMBER_2	10
SOUND_CMD_PLAY_NUMBER_3	11
SOUND_CMD_PLAY_NUMBER_4	12
SOUND_CMD_PLAY_NUMBER_5	13
SOUND_CMD_PLAY_PLAY	14
SOUND_CMD_PLAY_WELL_DONE	15

9 REALIZACE LASER GAME SYSTÉMU

V této kapitole se budu zabývat jednotlivými částmi Laser Game systému a popisem souvislostí mezi jednotlivými bloky s kterých jsou tyto části vytvořeny.

9.1 Vesta

Vesta je rozdělena do několika bloků, aby byl její návrh jednodušší a také modułárnější, aby v případě potřeby úpravy parametrů stačilo upravit jen požadovaný blok.



Obr. 9.1: Blokové schéma vesty

Řídící jednotkou vesty je 32b MCU STM32F405RGT založený na ARM jádru Cortex M4, jeho základními parametry jsou 1 MB FLASH paměti a 192 kB RAM.

MCU využívá čtyř separátních UART sběrnic pro komunikaci se subsystémy vesty. Prostřednictvím RF modulu HM-TRP zajišťuje komunikaci ze směrovačem. Zpracovává příchozí data z rádiového modulu a podle nich nastavuje parametry vesty či posílá směrovači informace.

Další úlohou řídicího MCU je zpracovávání dat z IR detektoru. Podle nich dochází k vyhodnocování zásahů hráče, pokud k zásahu dojde nebo je hráč z jiného důvodu vyřazen ze hry, pošle řídicí MCU příkaz do zbraně, aby byla zablokována střelba. Jakmile může hráč opět ve hře pokračovat, pošle do zbraně příkaz k odblokování.

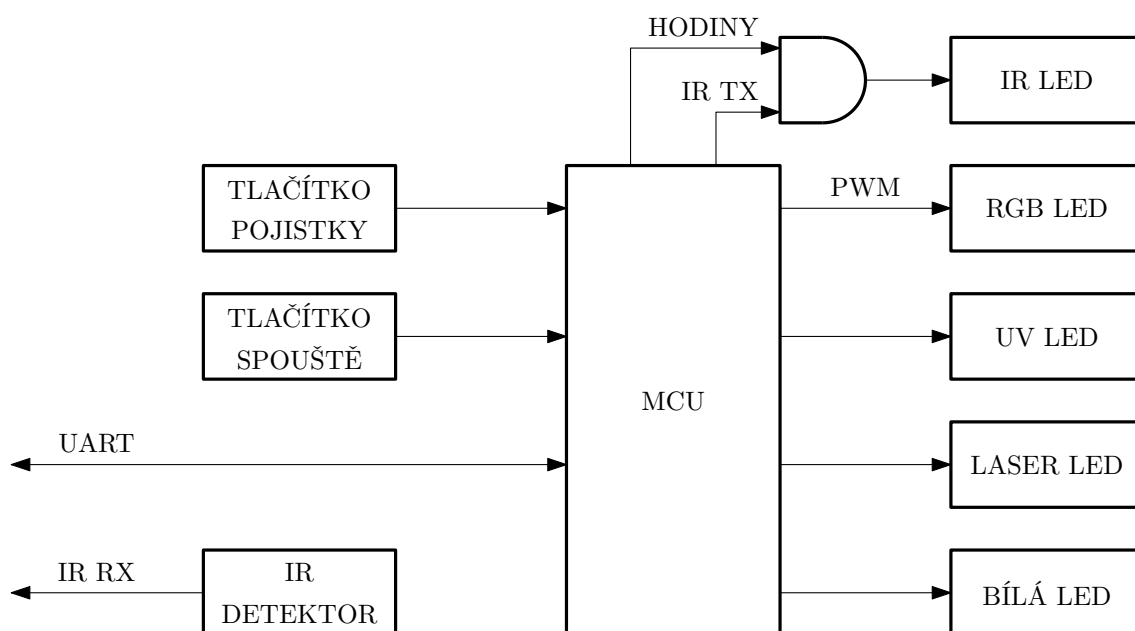
Řídící MCU také generuje PWM signál určený k nastavování barvy RGB LED.

Pokud je třeba sdělit hráči nějakou informaci, tak v závislosti na nastavení hry může řídicí MCU aktivovat zvukový subsystém, vypsat údaje na displej nebo použít RGB LED.

Po zapnutí si MCU zjistí svou adresu pomocí GPIO portu nastaveného jako vstupní s vnitřním pull-up rezistorem. Adresa je nastavena hardwarově při výrobě osazením rezistorů. Tato adresa je poté využívána v RF i IR komunikaci.

Poslední důležitou úlohou MCU je komunikace s napájecím subsystémem a monitorování stavu akumulátoru.

9.2 Zbraň



Obr. 9.2: Blokové schéma zbraně

Hlavní funkcí zbraně je vysílání IR signálu. Ten je generován MCU STM32F042F6P, který je založený na ARM jádru Cortex M0. Je vybaven 32 kB FLASH a 6 kB SRAM. Generovaný IR signál je složen ze dvou signálů a to nosného a datového. Tyto dva signály jsou směřovány dohromady pomocí hradla AND a následně je jím ovládána vysílací IR LED.

Zbraň dále obsahuje laserovou diodu, využívanou ke znázornění místa, kam hráč střílí. Dále jsou ve zbrani dostupné bílá, UV a RGB LED, které svítí v závislosti na nastavení hry.

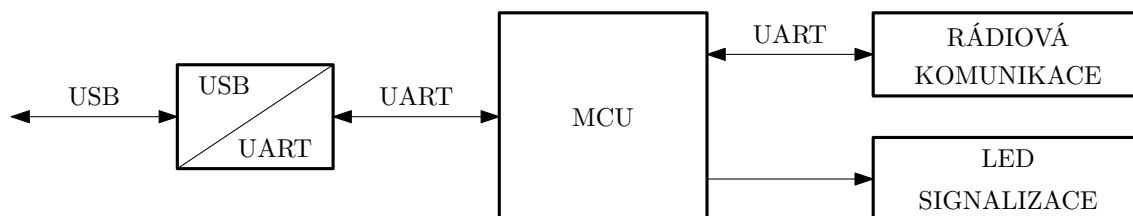
Zbraň je vybavena dvěma tlačítky, spouští, která slouží k ovládání vysílání, a pojistkou jejíž funkce závisí na nastavení hry. Buď je jejím stiskem podmíněna střelba a nebo je používána k ovládání svítilny realizované bílou či UV LED.

Zbraň je také vybavena IR detektorem, který není nijak spojen s MCU zbraně, nýbrž je propojen přímo s detekčním systémem vesty.

Komunikace mezi řídicím MCU vesty a MCU zbraně probíhá prostřednictvím rozhraní UART. Ze zbraně po této sběrnici přichází povolení a zákazy střelby, případně nastavení RGB LED, naopak zbraň se ptá vesty na její adresu a nastavení RGB.

Zbraň je spojena z vestou pomocí kabelu, tím je napájena a také jeho prostřednictvím může komunikovat z vestou.

9.3 Směrovač



Obr. 9.3: Blokové schéma směrovače

Pomocí RF modulu zajišťuje komunikaci se zařízeními v síti. Je také vybaven MCU STM32F405RGT, které je pro co nejrychlejší zpracovávání rámců z vest taktováno na 160 MHz. Na základě požadavků z řídicího počítače nastavuje zařízení v síti. Přiděluje zařízením v síti komunikační okna a získané informace ze zařízení zasílá opět do řídicího počítače. Zajišťuje také jednotné časování vest v síti.

10 ZÁVĚR

Podařilo se mi navrhnout velmi spolehlivý protokol pro přenos dat pomocí infračerveného záření, založený na 16b CRC, díky tomu je chybovost systému $1,526 \cdot 10^{-5}$. První verze návrhu se potýkala s problémem zahlcování detektorů shluky nul a následnou chybnou interpretací zkreslených dat.

Druhá verze problémy odstranila návrhem nového robustního komunikačního protokolu. Navržený protokol korektně přenáší i rámce plné nul, protože byla změněna reprezentace logických hodnot v komunikaci ze stavů svítí nesvítí na pulzy definovaných délek. Výhodou tohoto systému je i možnost zjistit výpadek při probíhající komunikaci, protože i nula je přenášena jako pulz.

Dále byl navržen komunikační protokol pro rádiovou komunikaci v hvězdicové síti, který je založený na rámci proměnných délek, schopný v jednom rámci pojmout až 512 B dat. Protokol k ověřování platnosti dat používá 32b CRC, takže pravděpodobnost chyby je prakticky nulová ($2,328 \cdot 10^{-10}$).

V průběhu práce byla zhotovena a oživena elektronika pro dvě vesty a komunikační router. Cenové náklady na součástky a plošné spoje na jednu vestu se pohybují okolo 4 000 Kč, do nákladů ale není zahrnutý čas strávený vývojem a také není uvažována cena krabiček. V porovnání s cenami systému EVO-5, kde v přepočtu cena jedné vesty při koupi 16 vest se pohybuje okolo 50 000 Kč, je vybavení arény mým systémem mnohem levnější.

Výsledky mé práce jsou dostupné na mém osobním githubu, případně na githubu organizace laser game.

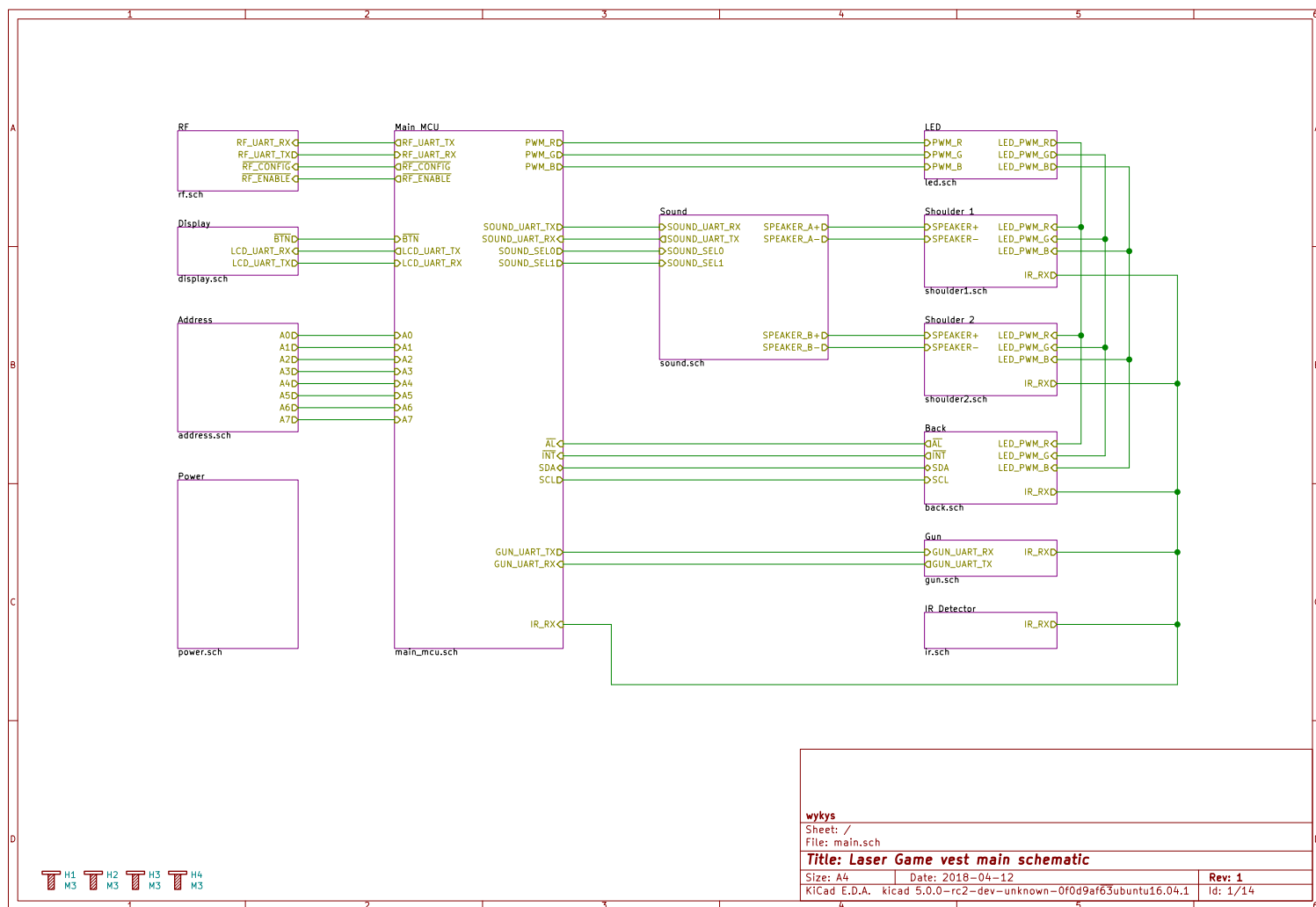
LITERATURA

- [1] MARTINEK, Radislav. *Senzory v průmyslové praxi*. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-114-4.
- [2] FROHN, Manfred. *Elektronika: polovodičové součástky a základní zapojení*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-123-3.
- [3] Cyclic redundancy check. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2017-12-11]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Cyclic_redundancy_check
- [4] HOLEČEK, Ondřej. CRC: kontrolní součet. *Root.cz* [online]. 2003 [cit. 2017-12-11]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/crc-kontrolni-soucet>
- [5] Laser tag In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2010 [cit. 2017-12-11]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_tag
- [6] *LaserMaxx* [online]. c2017 [cit. 2017-12-11]. Dostupné z: <https://www.laserm maxx.com>
- [7] *BQ24192* [online]. c2017 [cit. 2018-5-10]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq24192.pdf>
- [8] *LTC2941* [online]. c2017 [cit. 2018-5-10]. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/2941fb.pdf>
- [9] *STM32F0* [online]. c2017 [cit. 2018-5-10]. Dostupné z: http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference_manual/c2/f8/8a/f2/18/e6/43/96/DM00031936.pdf/files/DM00031936.pdf/jcr:content/translations/en.DM00031936.pdf
- [10] *STM32F4* [online]. c2017 [cit. 2018-5-10]. Dostupné z: http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference_manual/3d/6d/5a/66/b4/99/40/d4/DM00031020.pdf/files/DM00031020.pdf/jcr:content/translations/en.DM00031020.pdf
- [11] *OSRB38C9BA* [online]. c2017 [cit. 2018-5-10]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/Document/777fdf21e0fba3fd5c036ef95756460c/OSRB38C9BA.pdf>
- [12] *HM-TRP* [online]. c2017 [cit. 2018-5-10]. Dostupné z: <http://www.hoperf.com/upload/rf/HM-TRP.pdf>

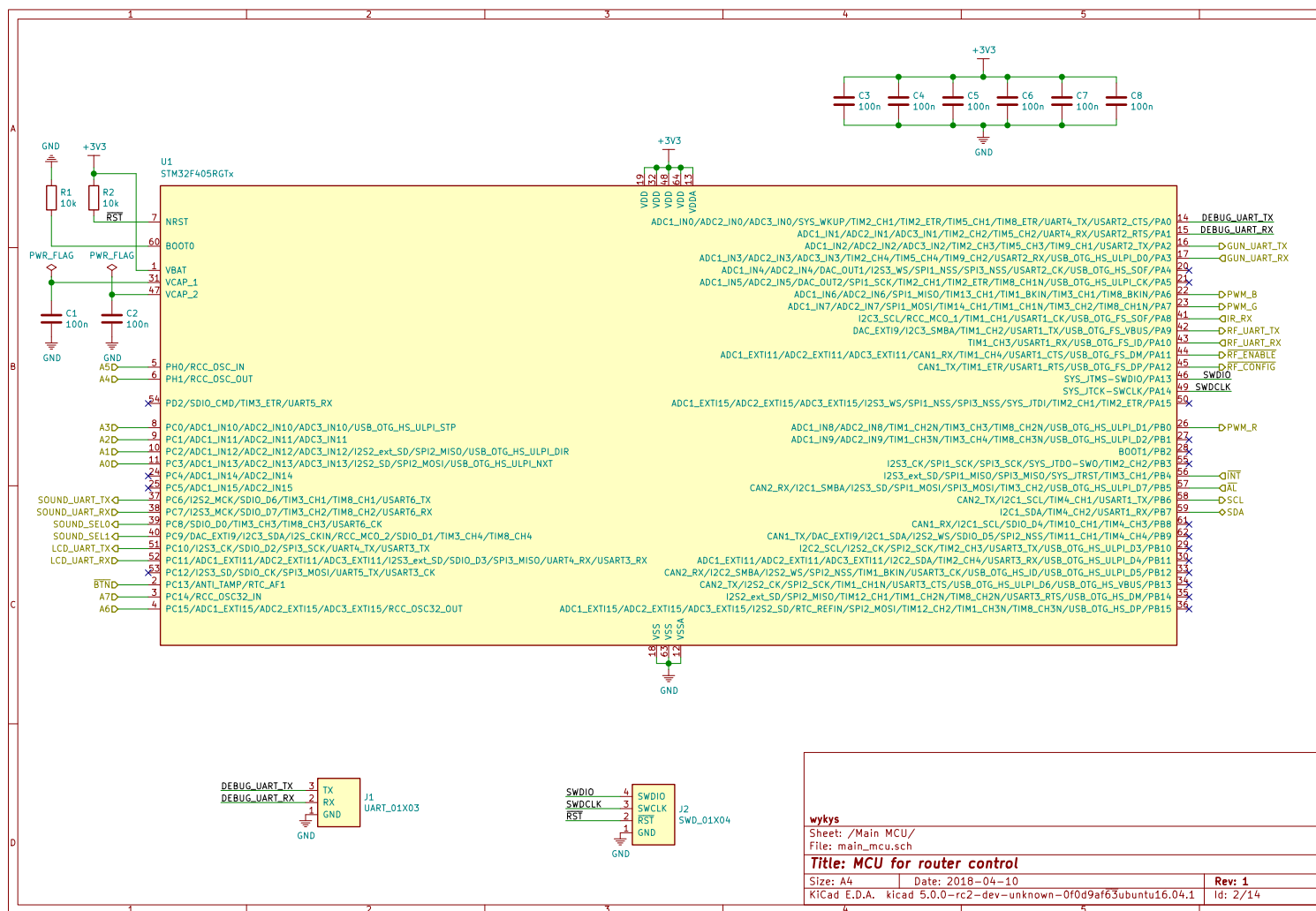
SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

RF	rádiové frekvence – Radio Frequency
IR	infračervený – Infra Red
RGB	červená-zelená-modrá – Red Green Blue
LED	světlo emitující dioda – Light Emitting Diode
LG	Laser Game
SW	Software
FW	Firmware
HW	Hardware
PC	osobní počítač – Personal Computer
MILIES	vojenský simulátor střelby – Multiple Integrated Laser Engagement System
NATO	Severoatlantická aliance – North Atlantic Treaty Organization
WiFi	bezdrátová věrnost, označení několika standardů IEEE 802.11 pro bezdrátovou komunikaci – Wireless Fidelity
CRC	cyklický redundantní součet – Cyclic Redundancy Check
XOR	exkluzivní součet – Exclusive or
UART	univerzální asynchronní přijímač-vysílač – Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
MCU	jednočipový počítač – Microcontroller unit
GPIO	vstupní/výstupní pin pro obecné použití – General-purpose input/output
PWM	pulzně šířková modulace – Pulse-Width Modulation
DMA	přímý přístup do paměti – Direct Memory Access
DAC	digitálně analogový převodník – Digital Analog Converter
LDO	nízko-úbytkový regulátor – Low-dropout regulator
DPS	Deska Plošných Spojů
PCB	deska plošných spojů – Printed circuit board

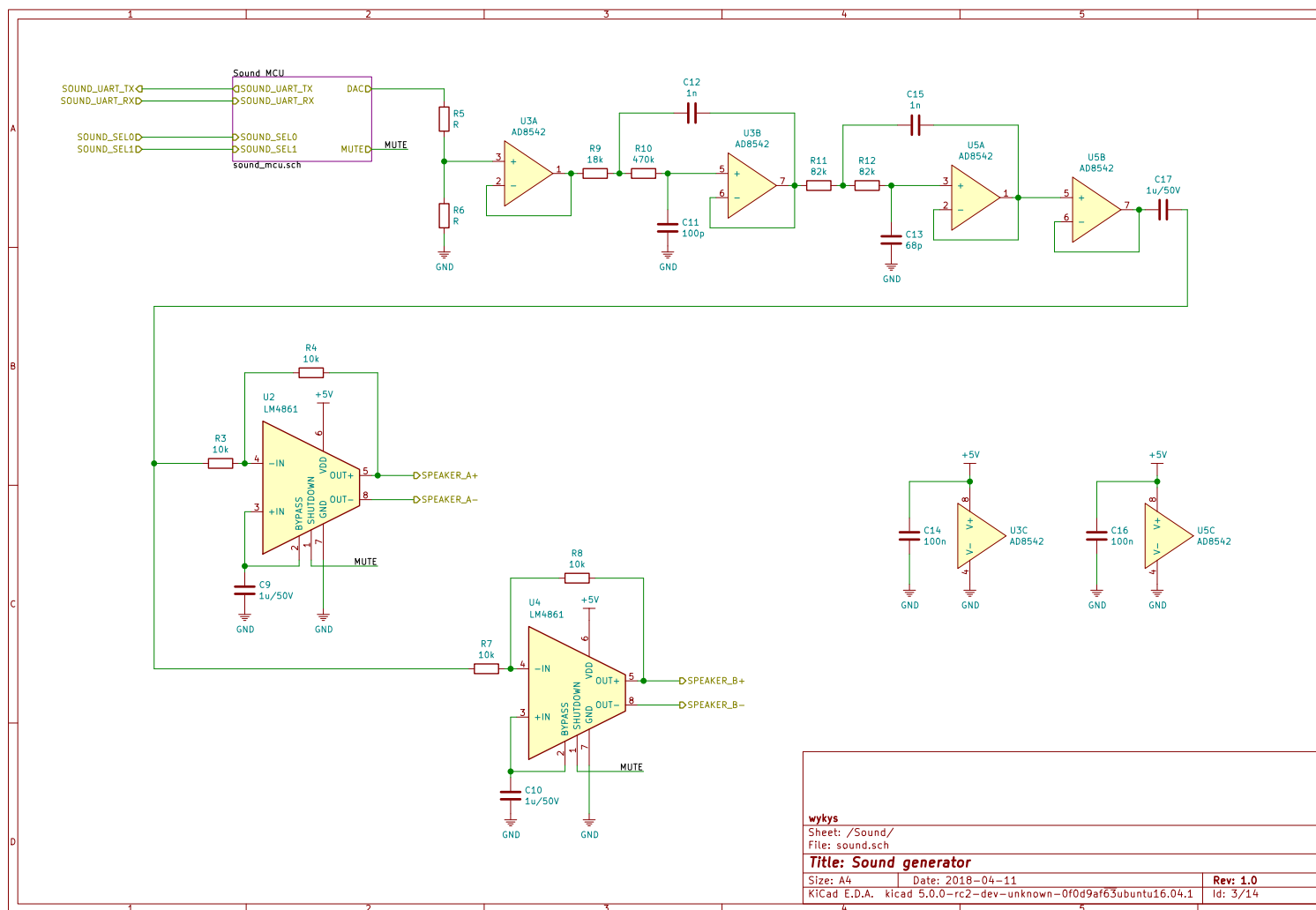
A PŘILOŽENÁ SCHÉMATA ZAPOJENÍ



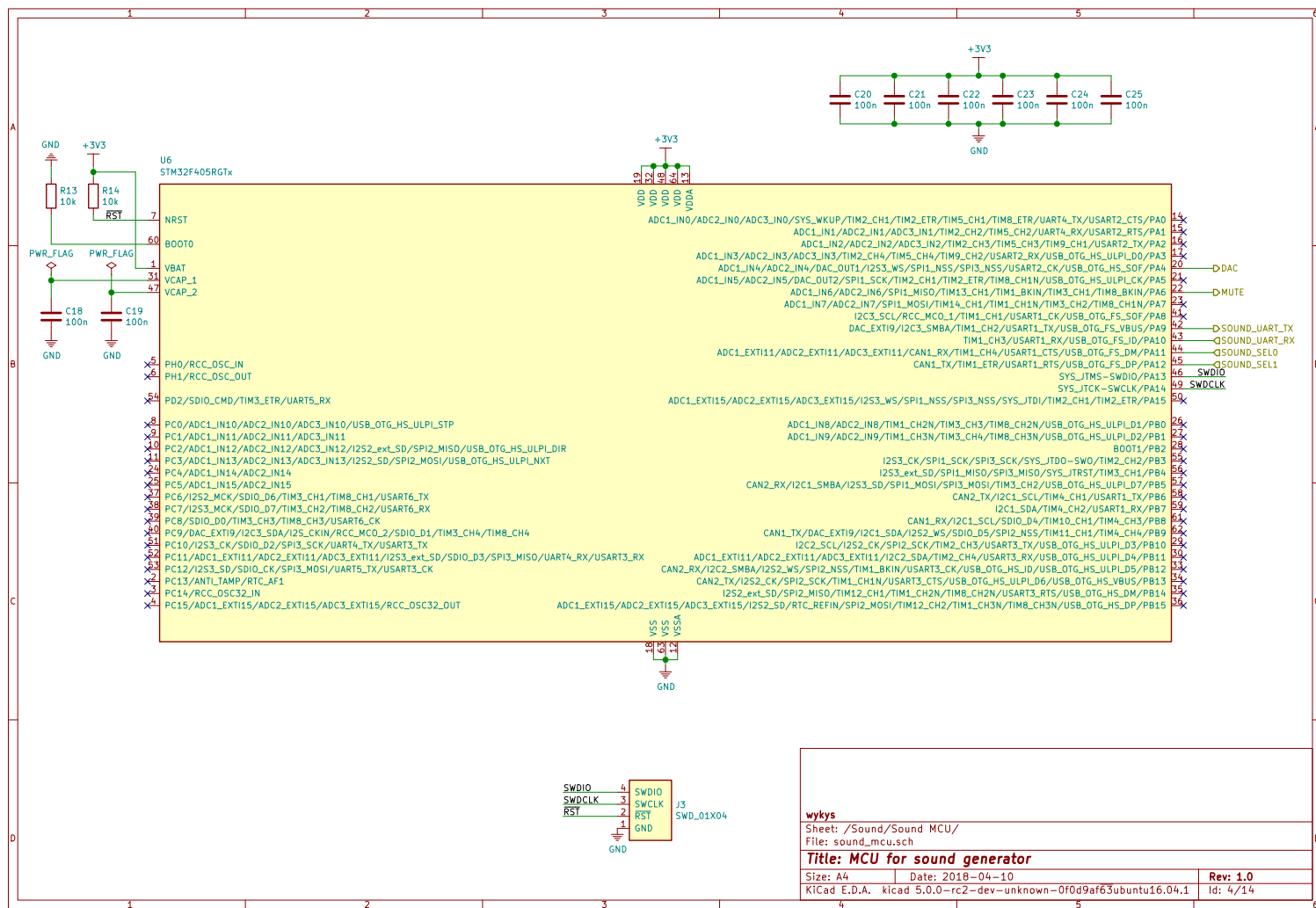
Obr. A.1: Schéma zapojení hlavní desky vesty strana 1



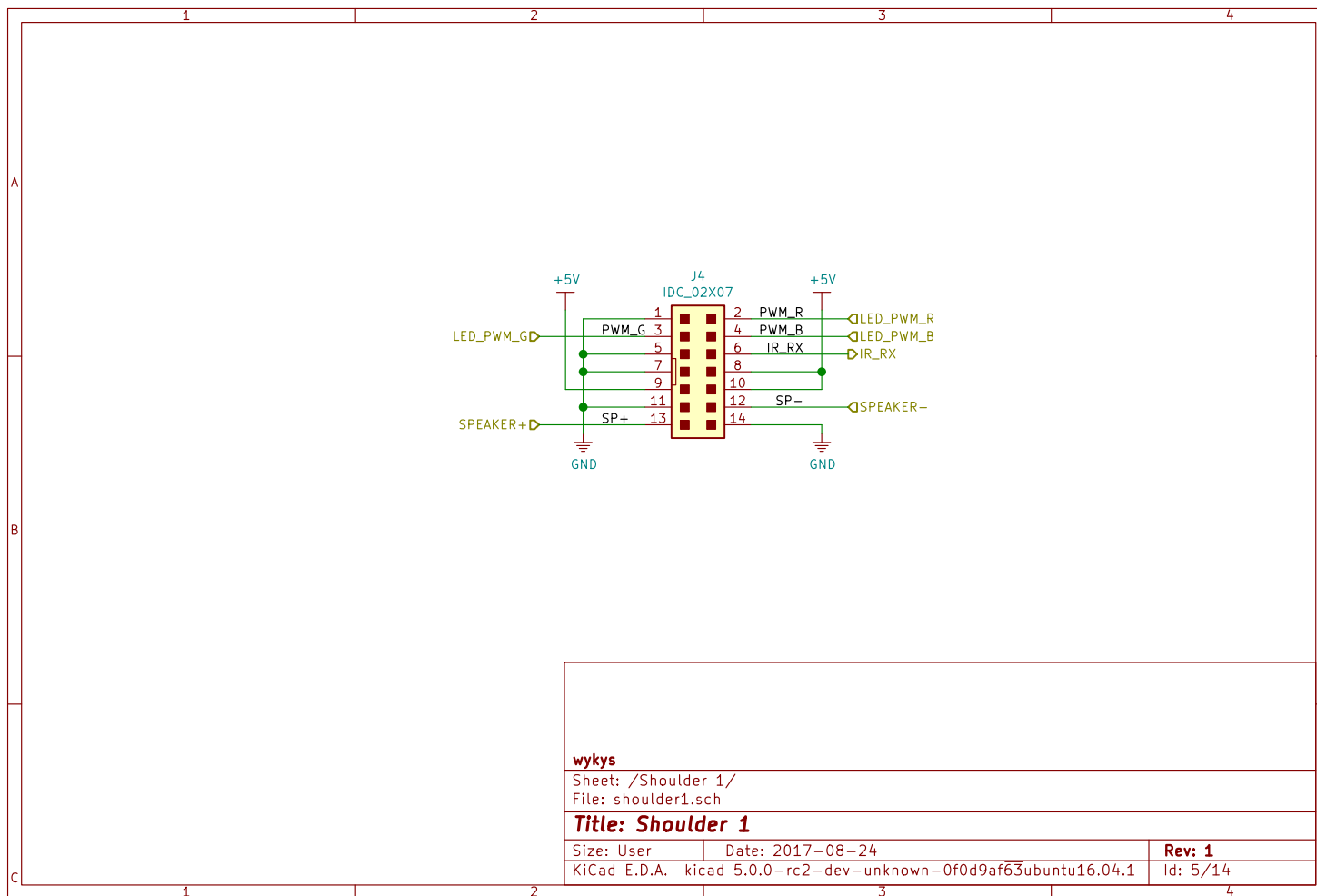
Obr. A.2: Schéma zapojení hlavní desky vesty strana 2



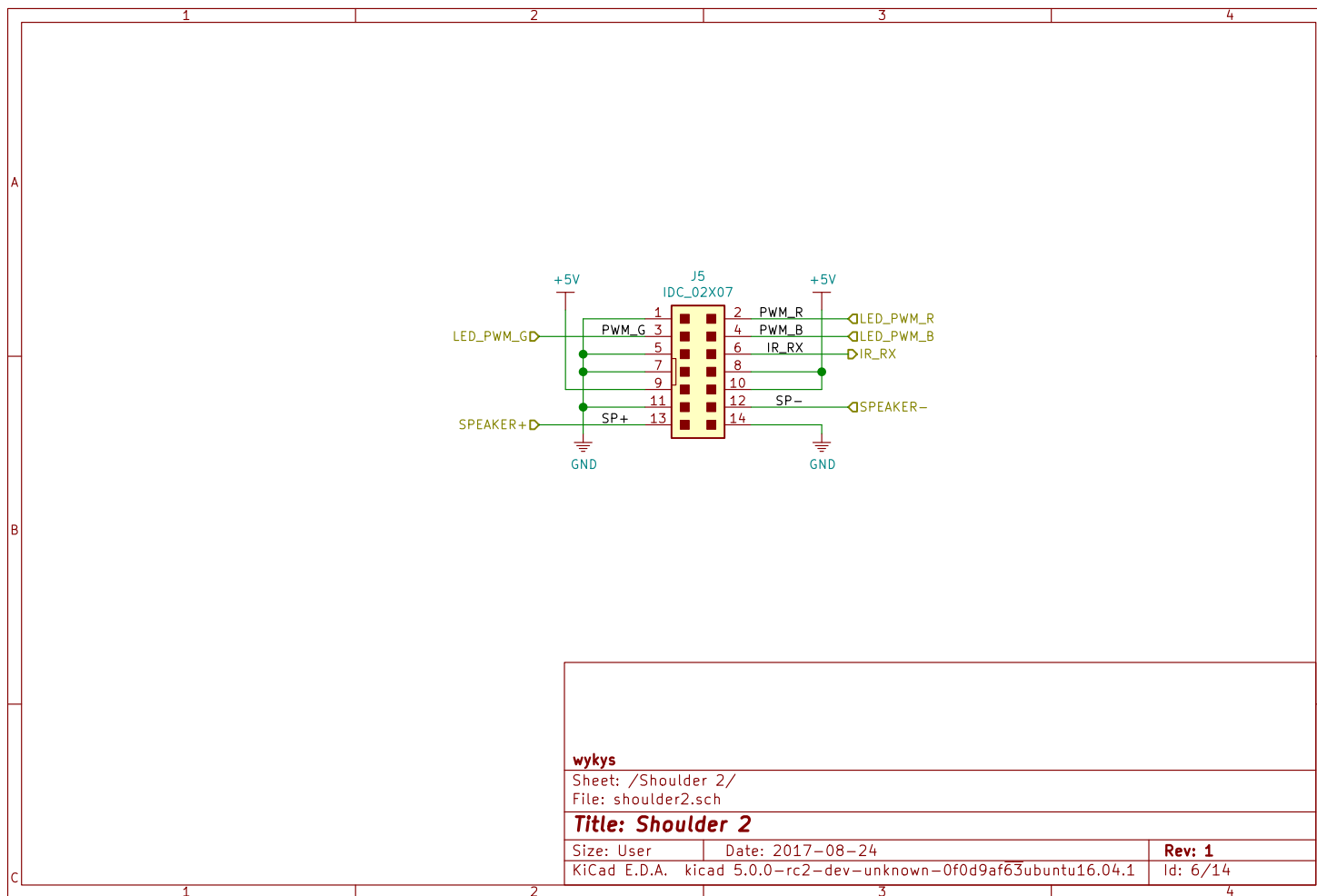
Obr. A.3: Schéma zapojení hlavní desky vesty strana 3



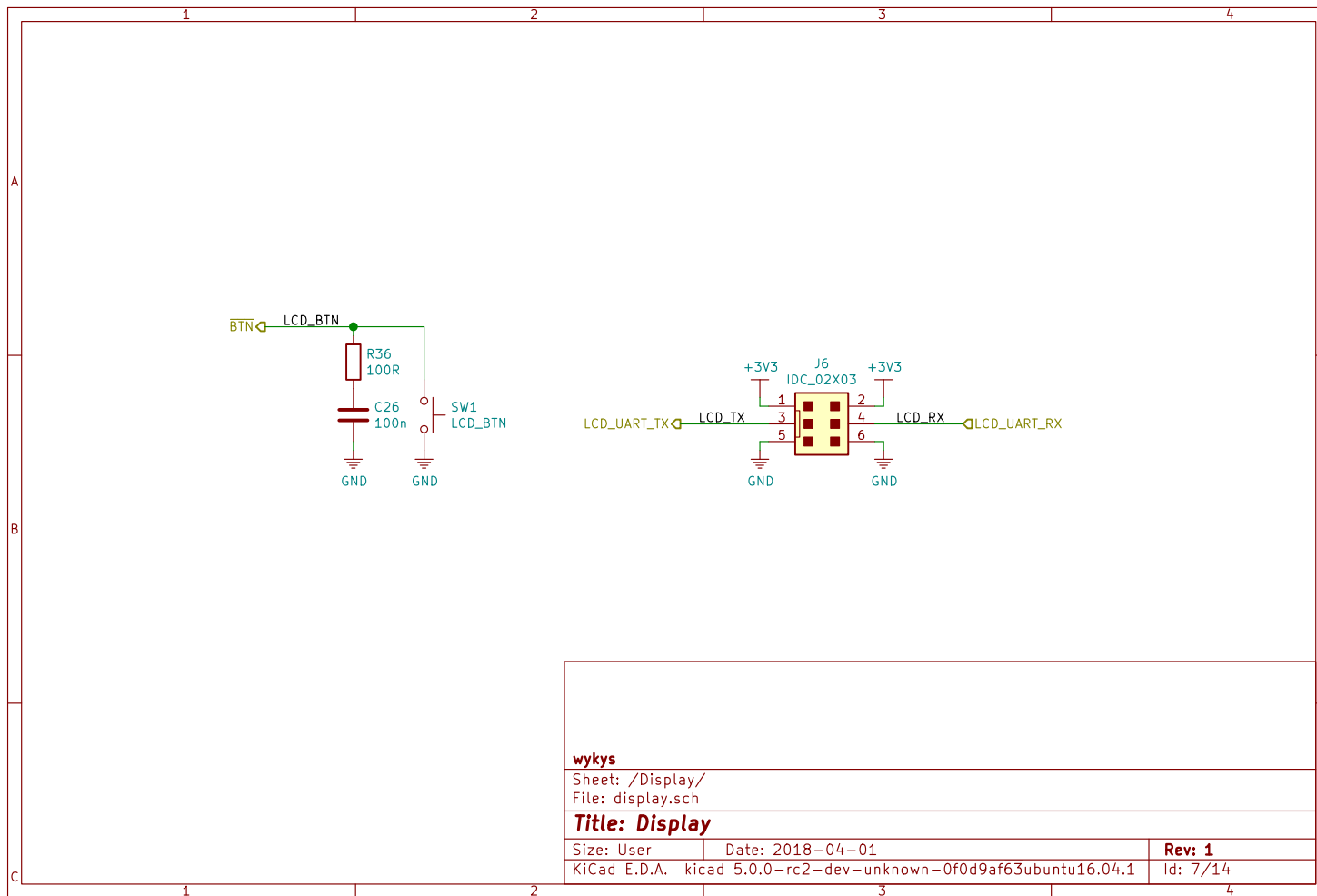
Obr. A.4: Schéma zapojení hlavní desky vesty strana 4



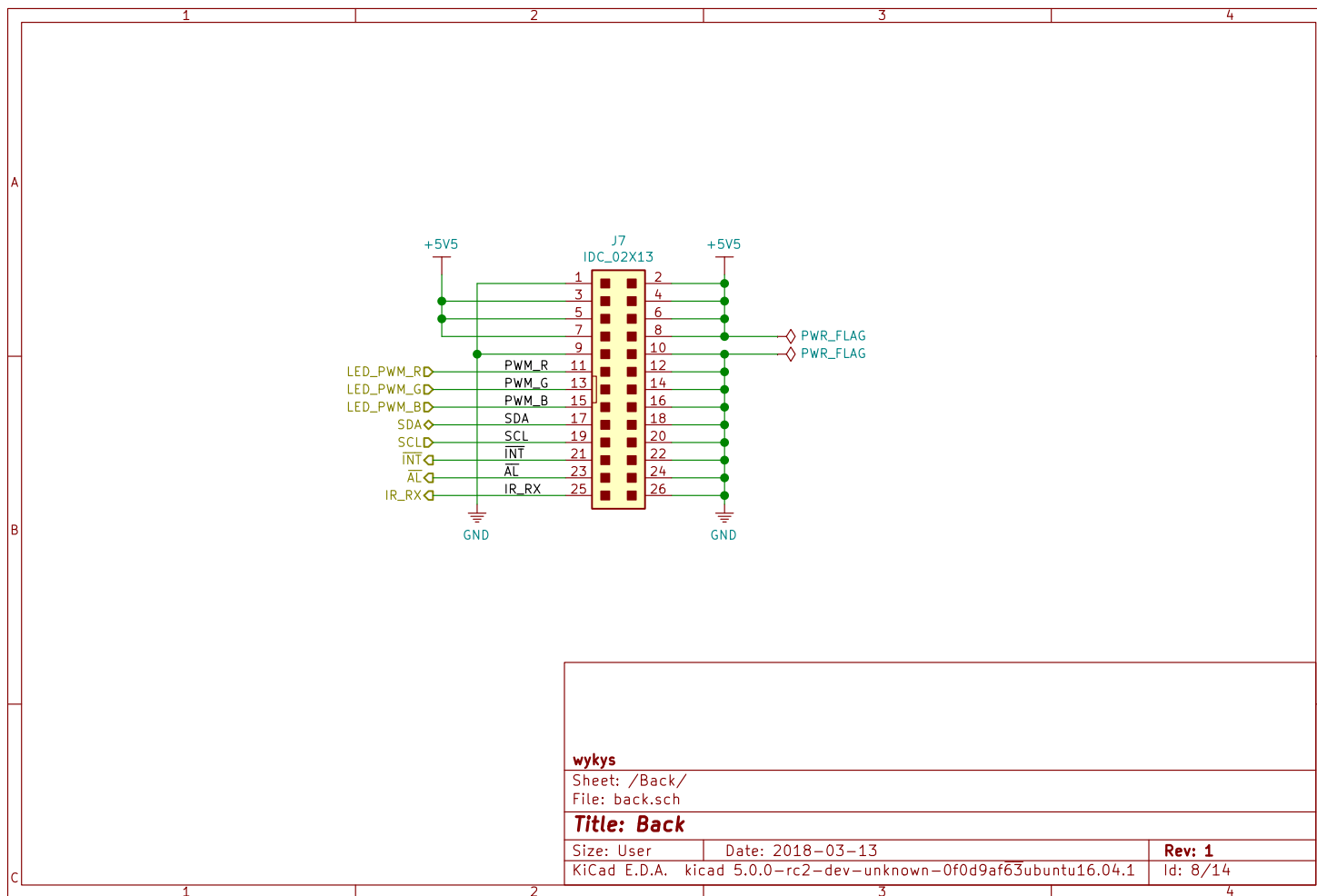
Obr. A.5: Schéma zapojení hlavní desky vesty strana 5



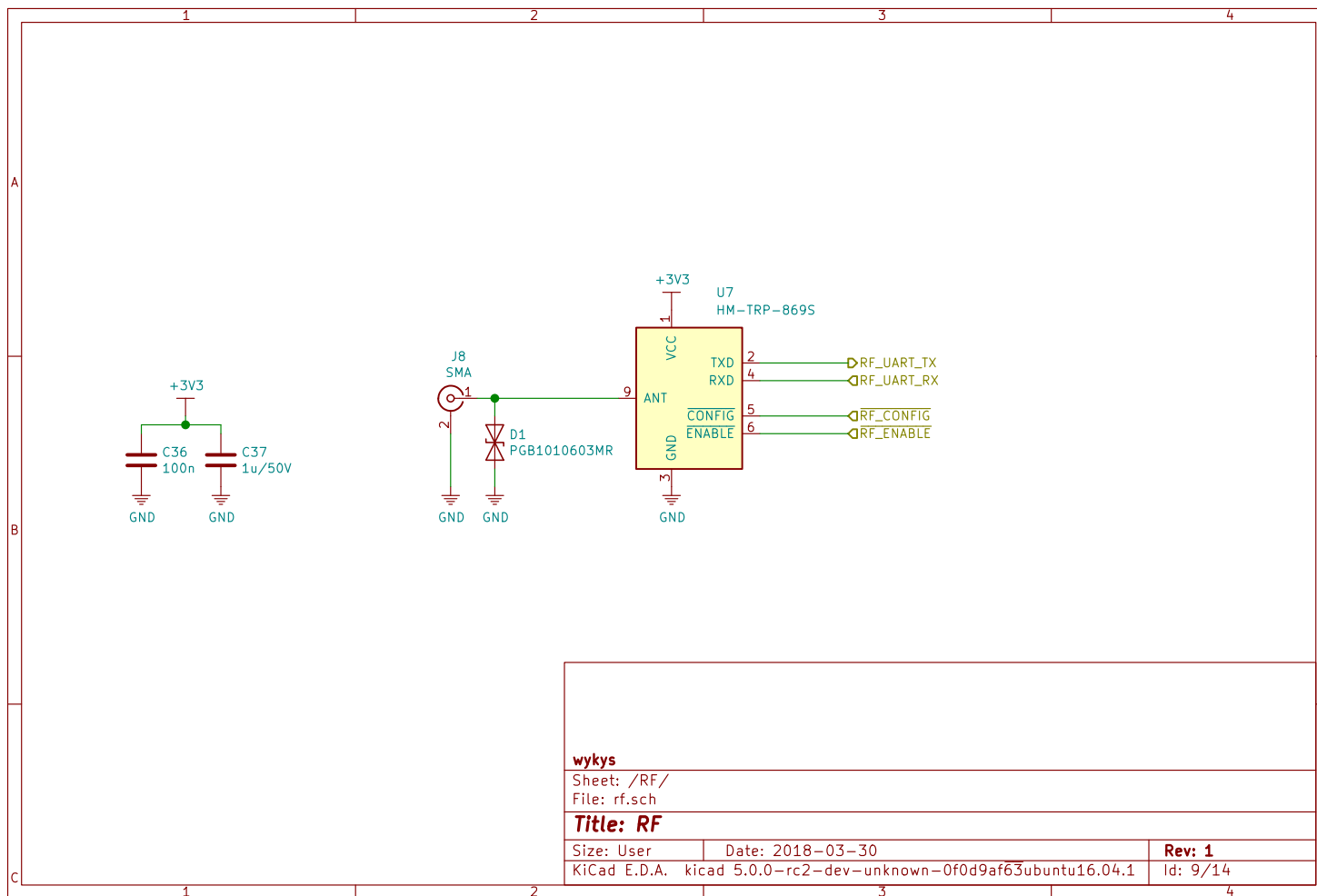
Obr. A.6: Schéma zapojení hlavní desky vesty strana 6



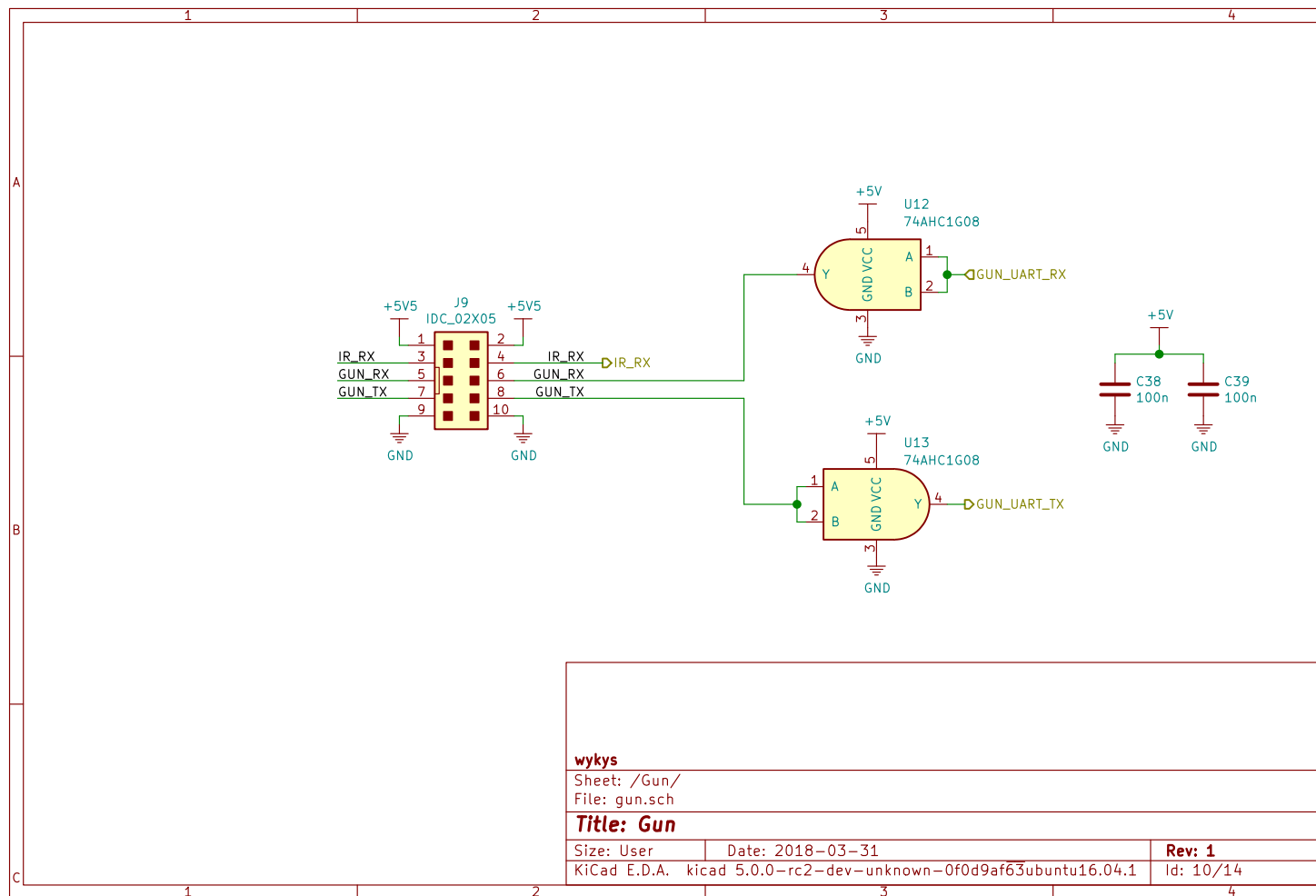
Obr. A.7: Schéma zapojení hlavní desky vesty strana 7



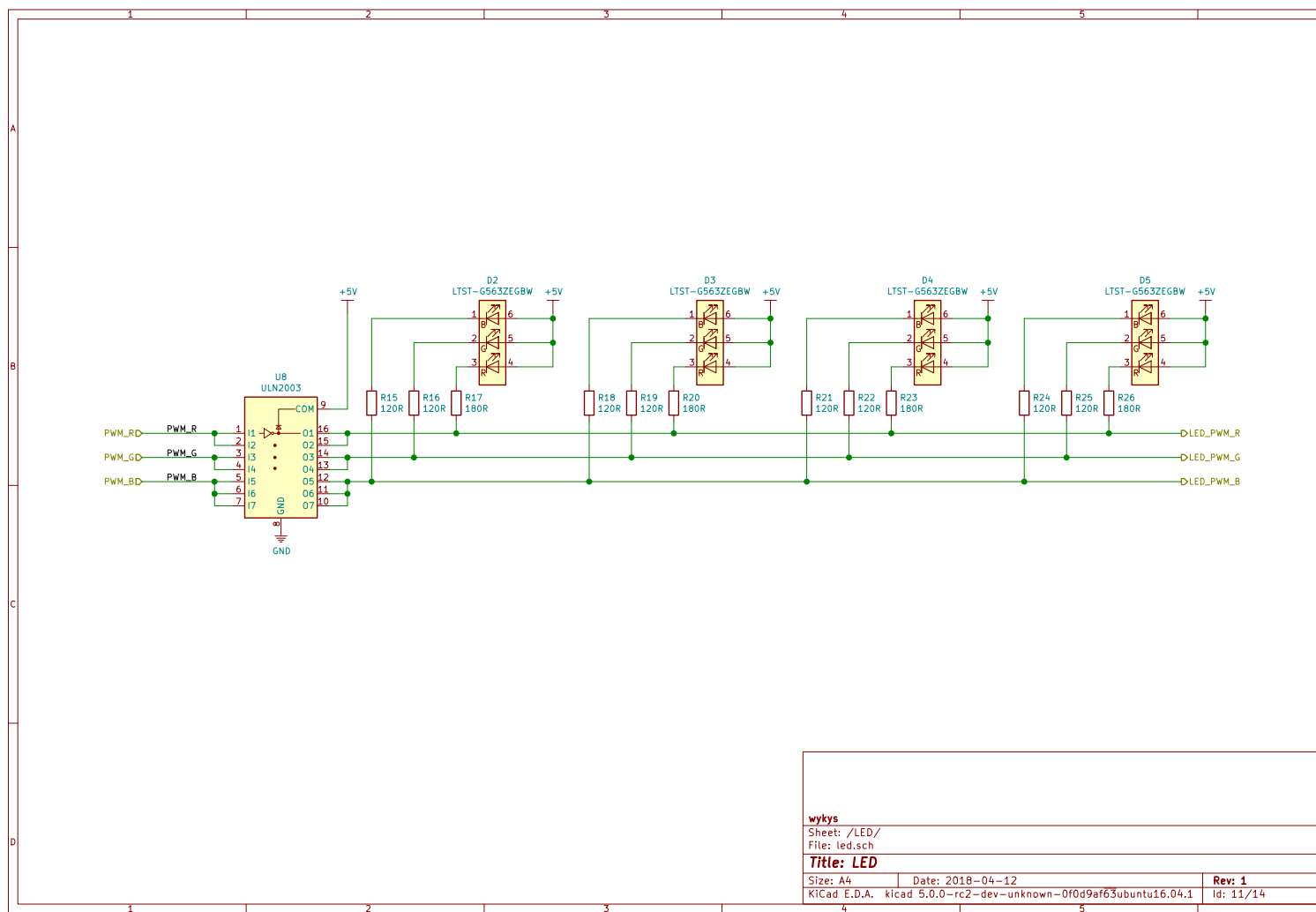
Obr. A.8: Schéma zapojení hlavní desky vesty strana 8



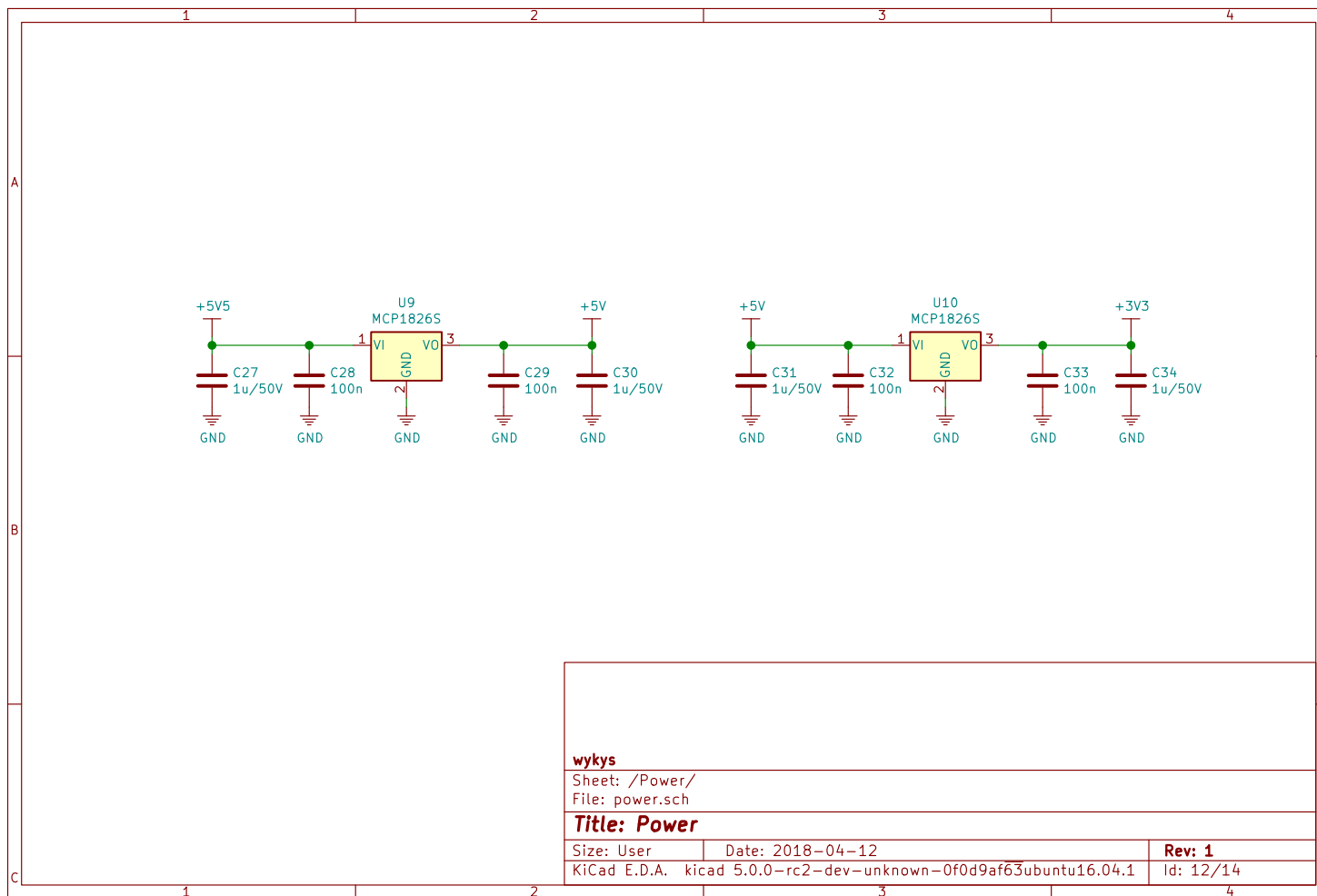
Obr. A.9: Schéma zapojení hlavní desky vesty strana 9



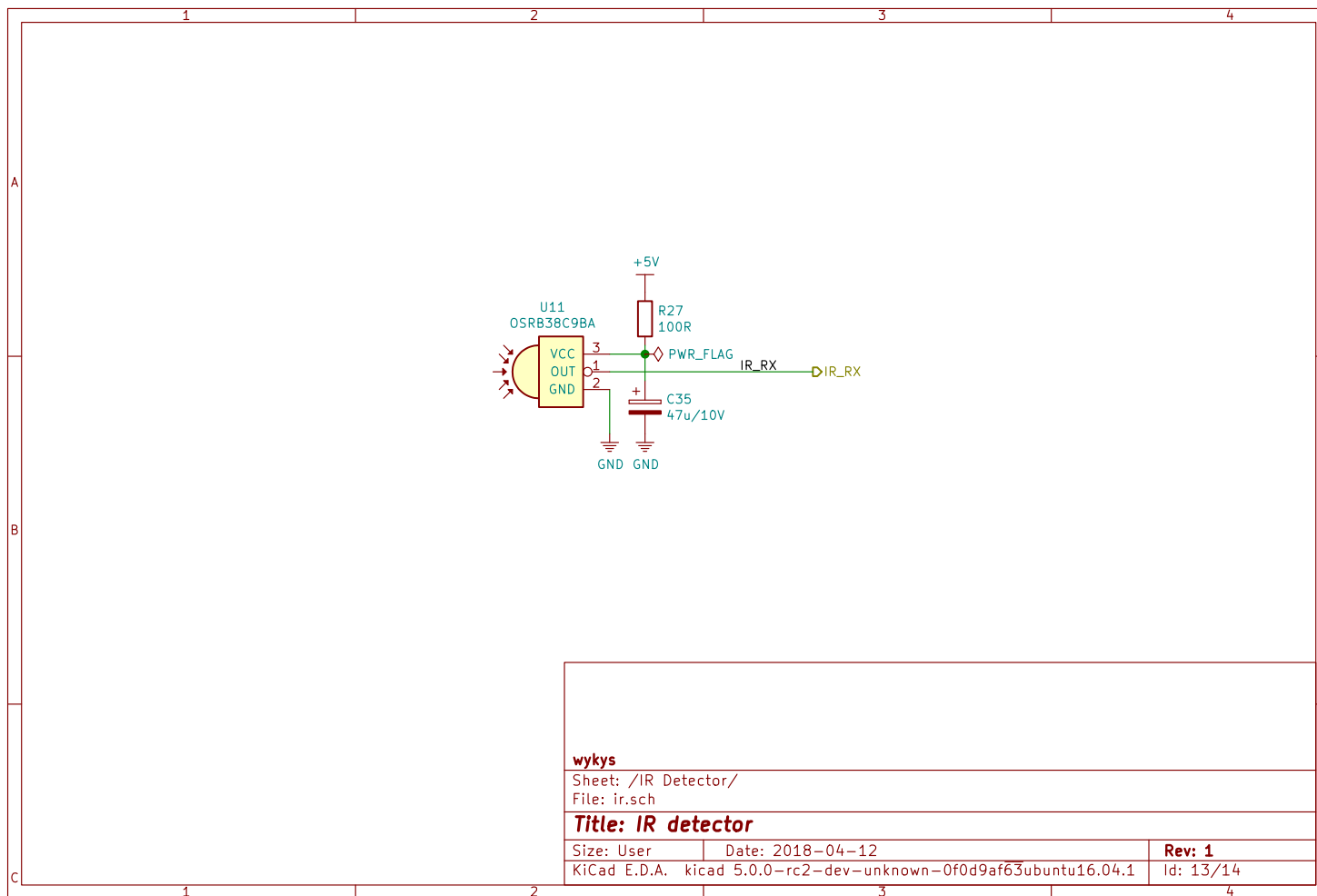
Obr. A.10: Schéma zapojení hlavní desky vesty strana 10



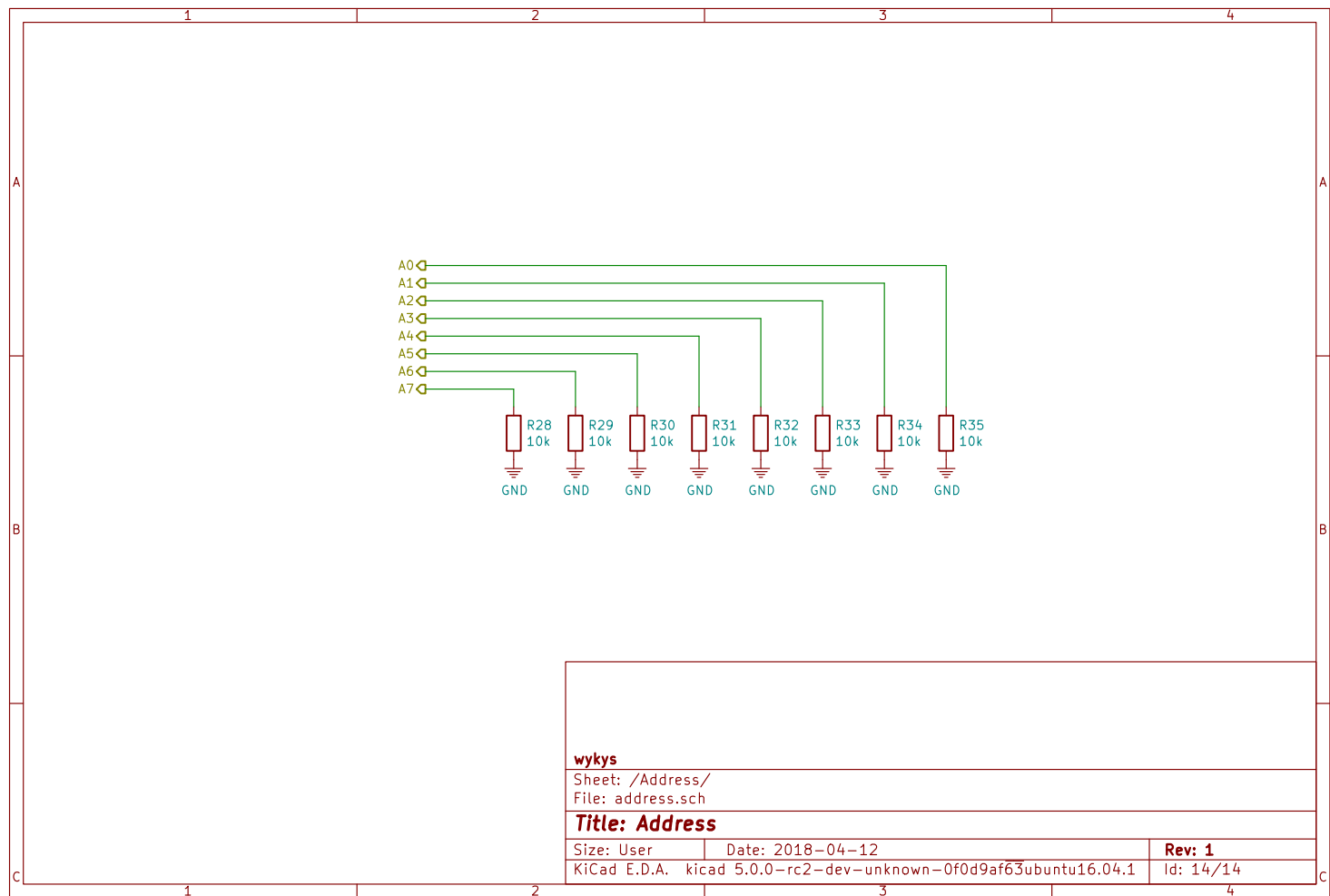
Obr. A.11: Schéma zapojení hlavní desky vesty strana 11



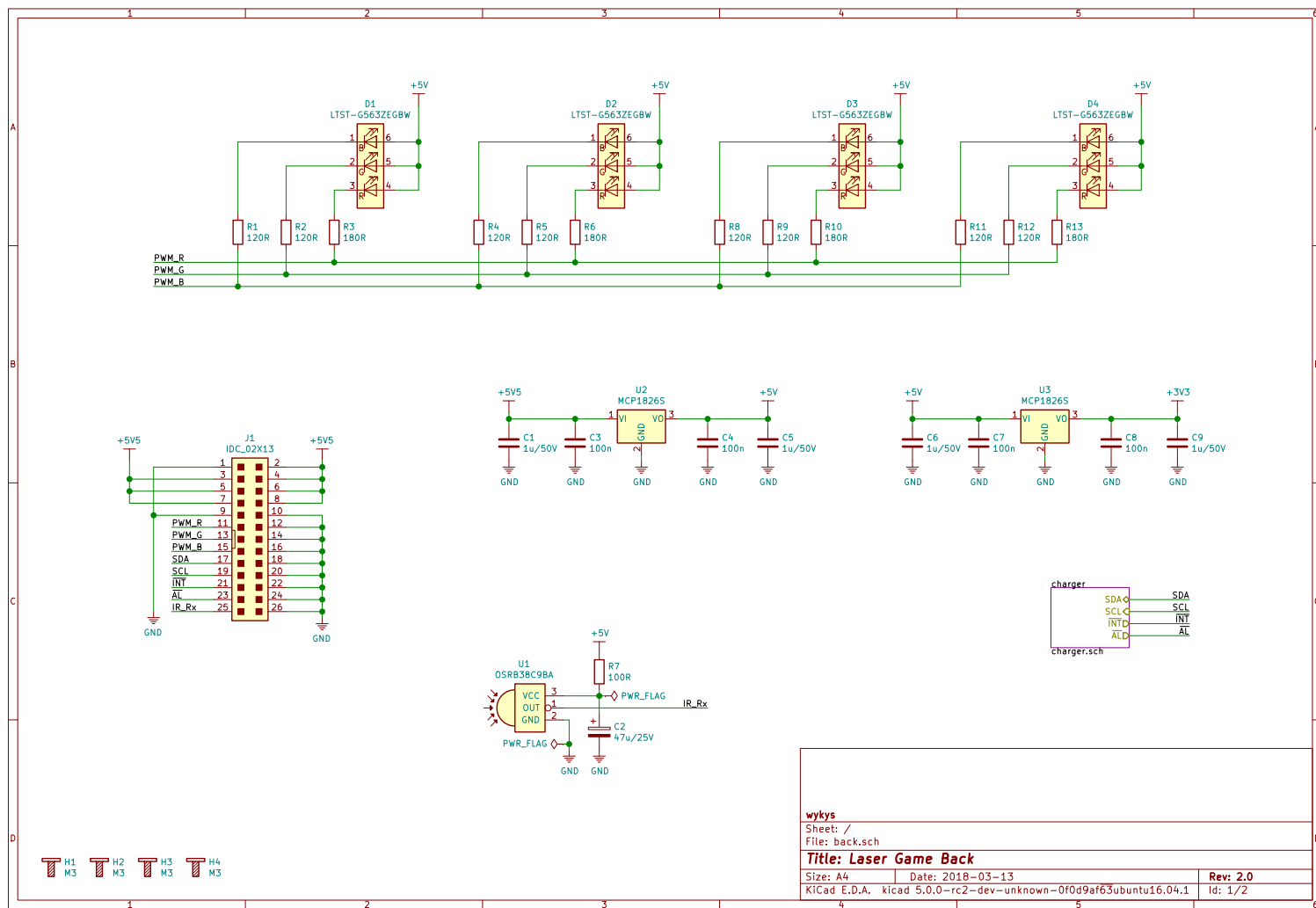
Obr. A.12: Schéma zapojení hlavní desky vesty strana 12



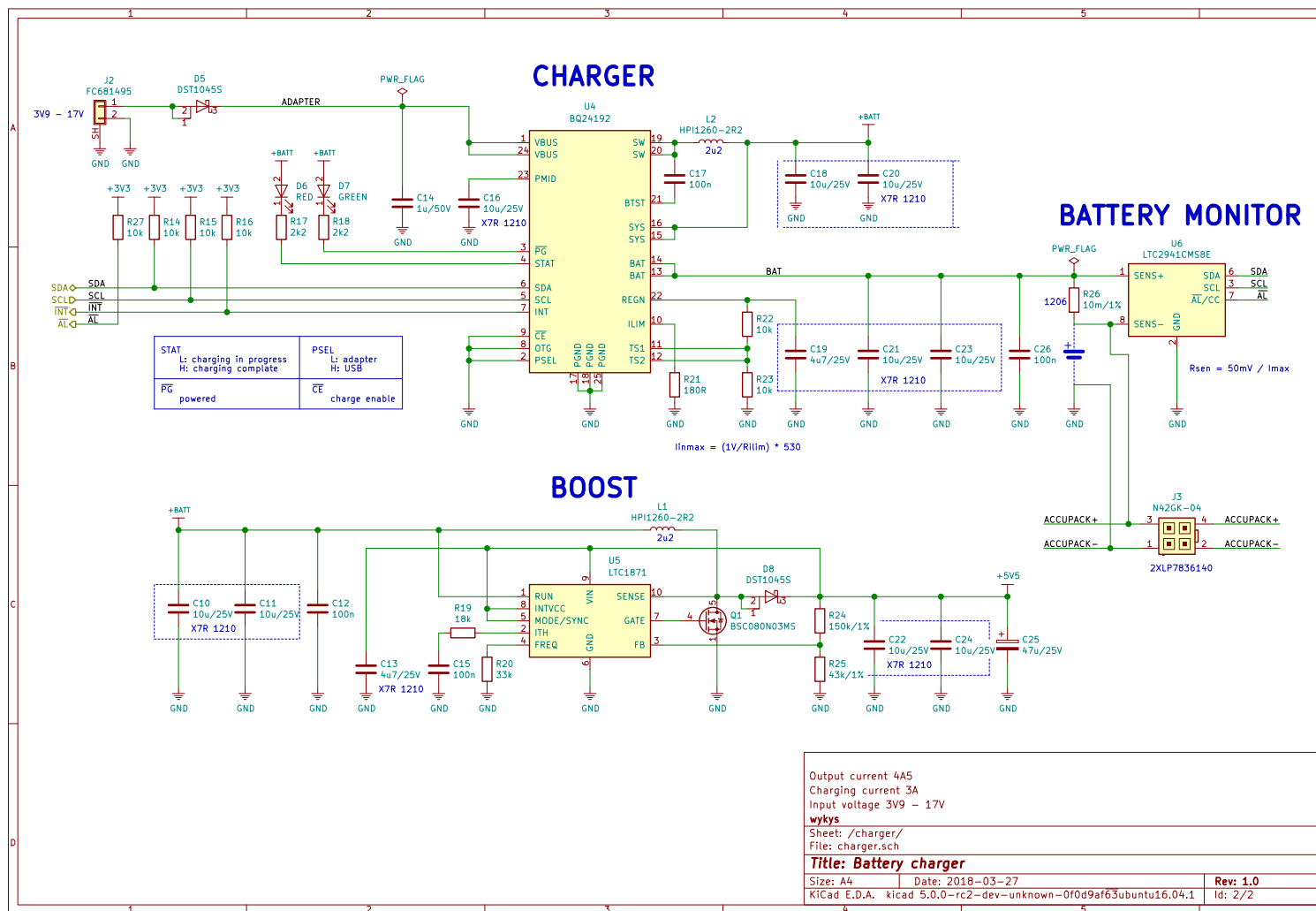
Obr. A.13: Schéma zapojení hlavní desky vesty strana 13



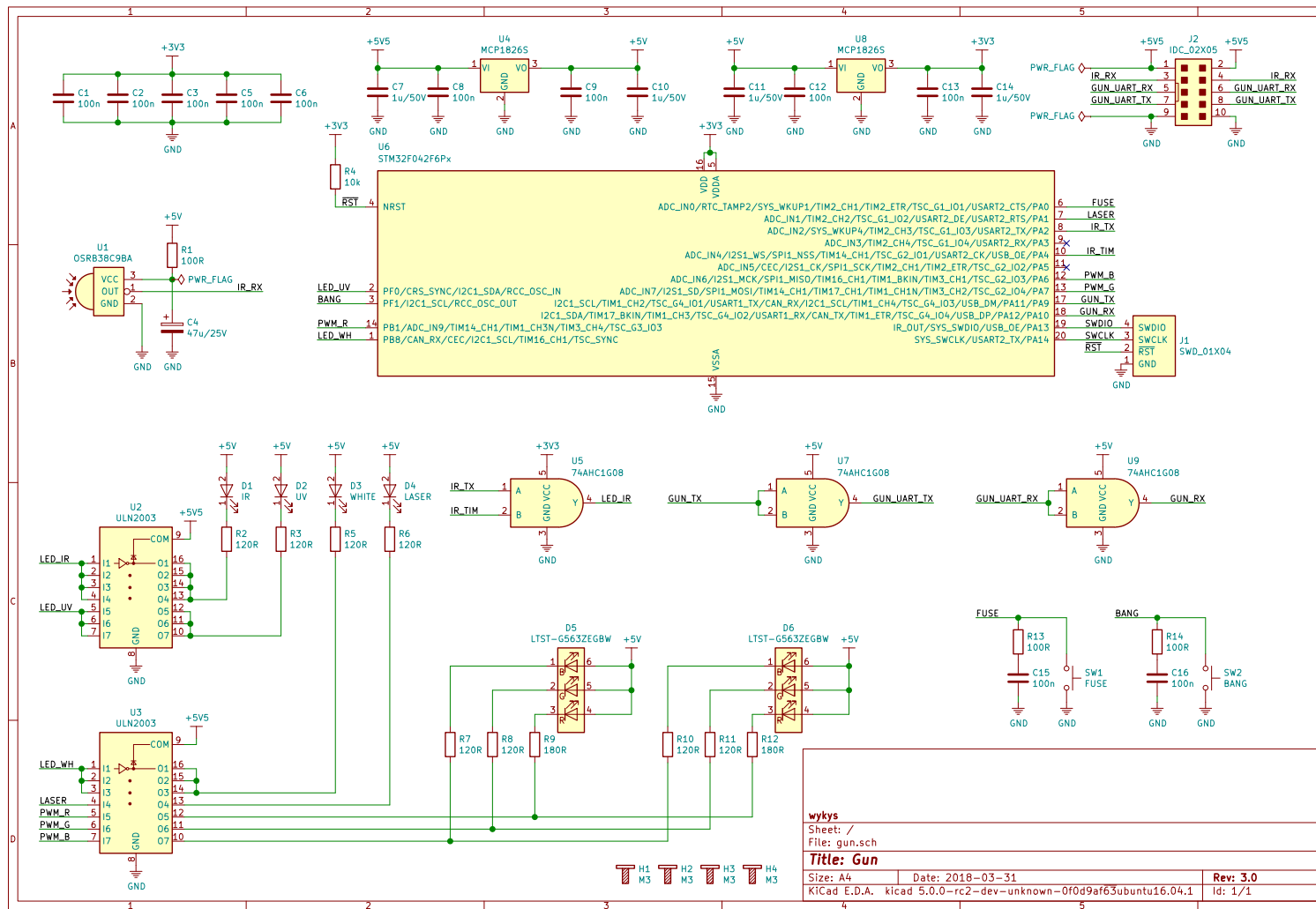
Obr. A.14: Schéma zapojení hlavní desky vesty strana 14



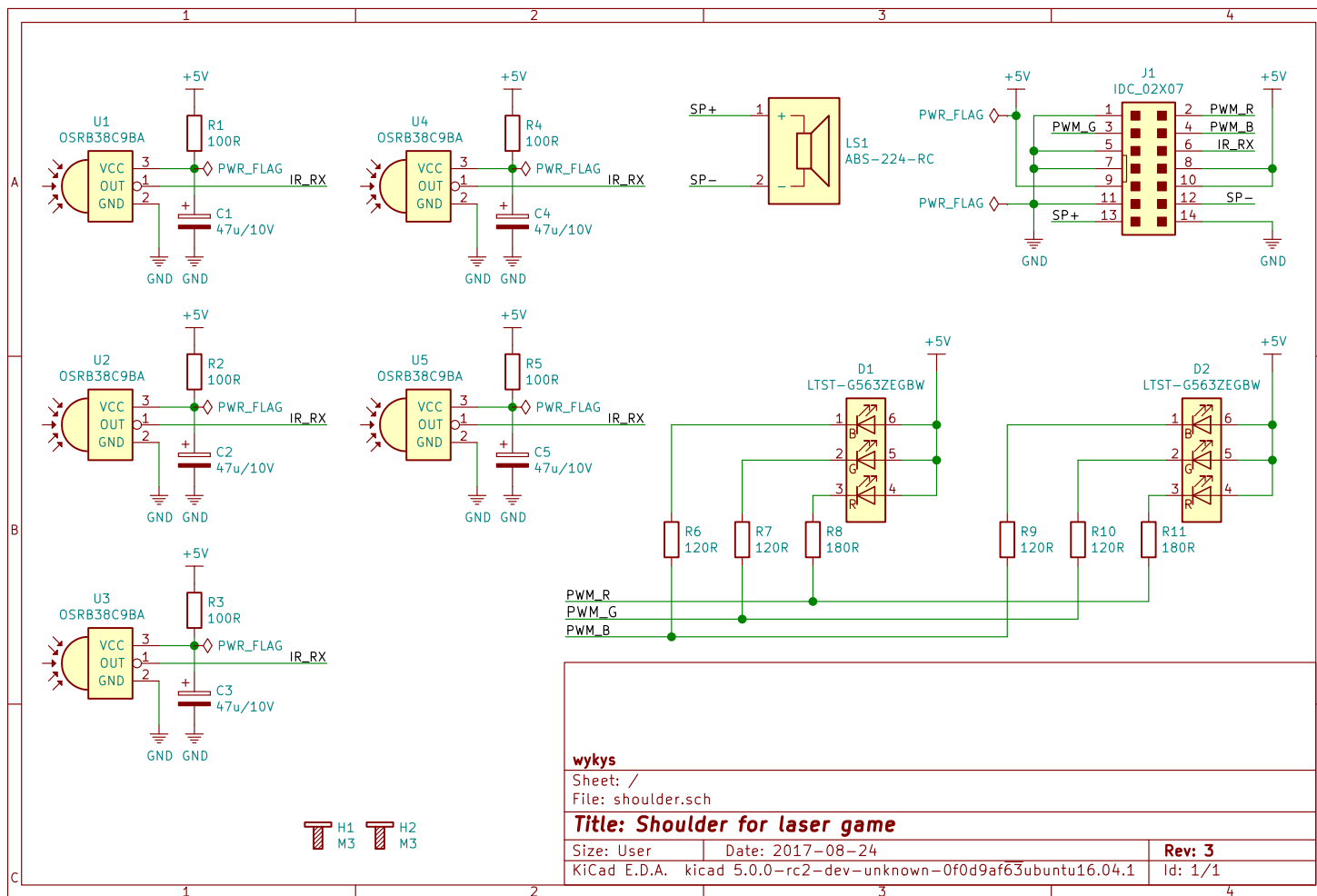
Obr. A.15: Schéma zapojení nabíječky vesty strana 1



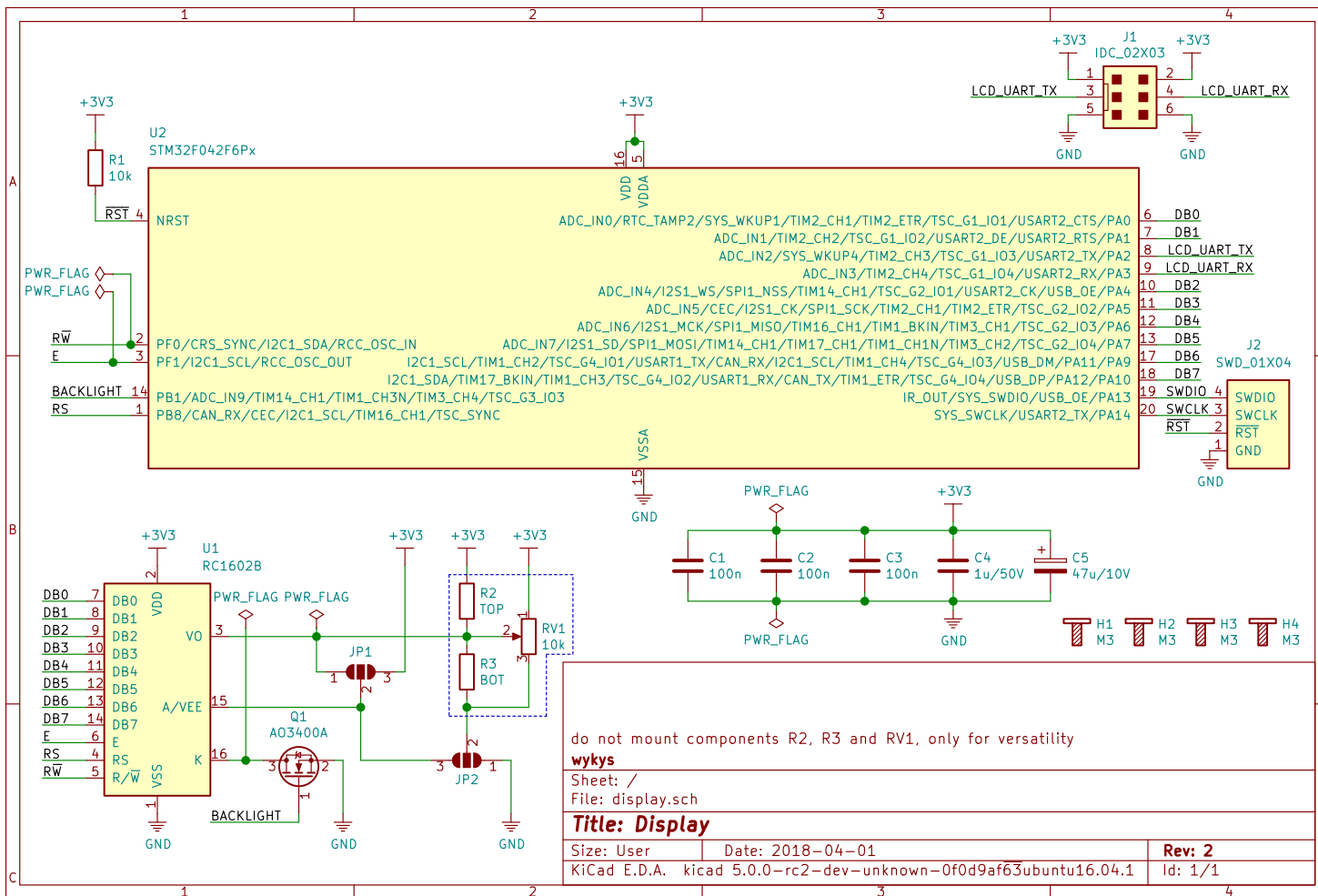
Obr. A.16: Schéma zapojení nabíječky vesty strana 2



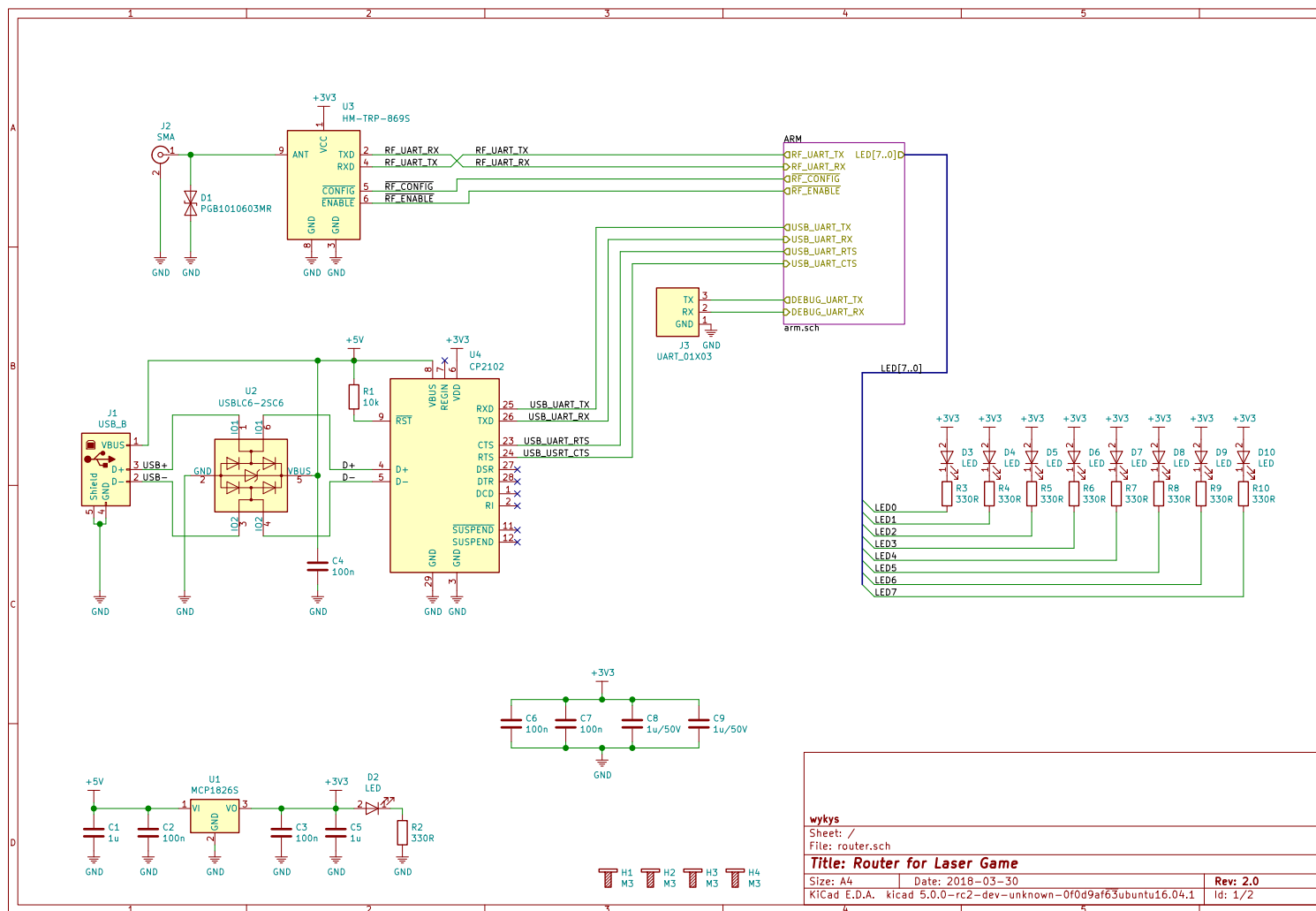
Obr. A.17: Schéma zapojení zbraně



Obr. A.18: Schéma zapojení desky na rameno



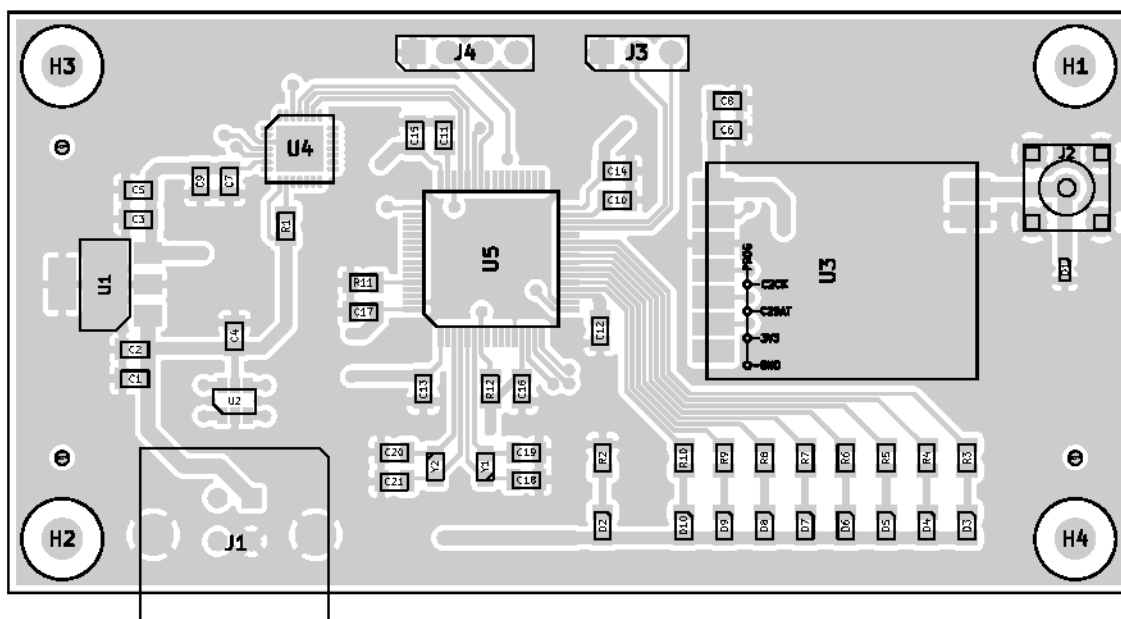
Obr. A.19: Schéma zapojení zobrazovače



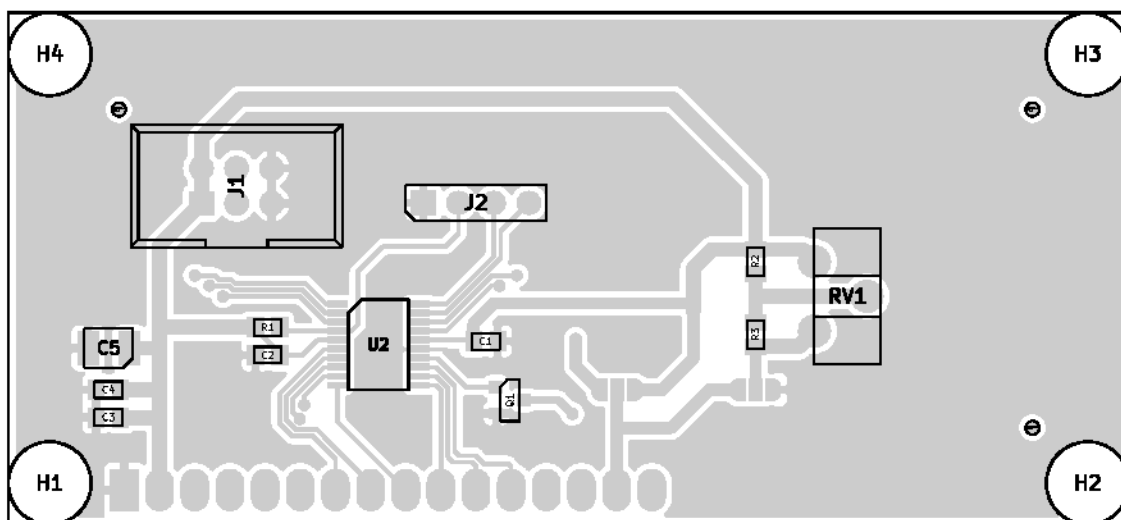
Obr. A.20: Schéma zapojení směrovače strana 1

Obr. A.21: Schéma zapojení směrovače strana 2

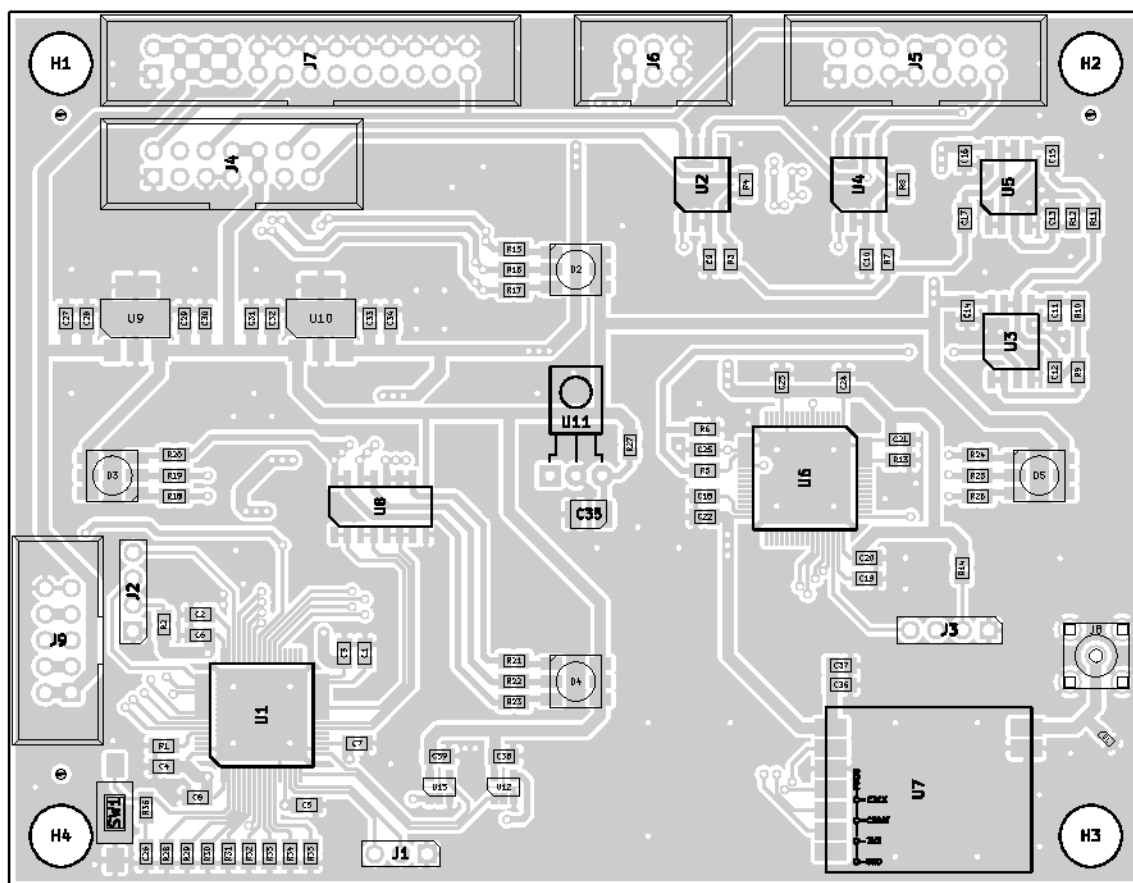
B PŘILOŽENÉ OSAZOVACÍ PLÁNY



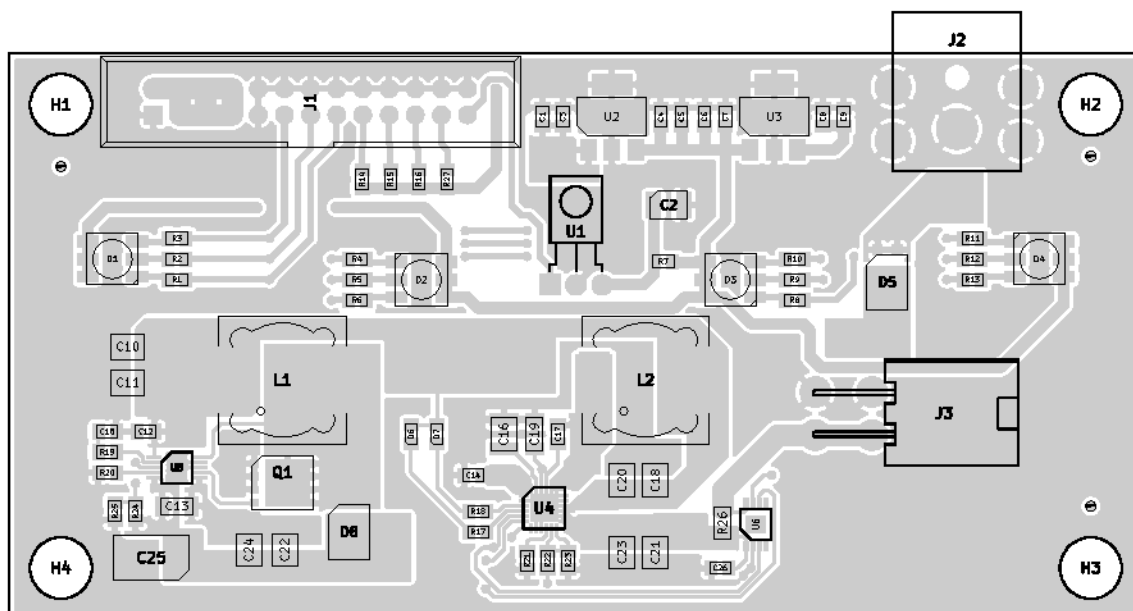
Obr. B.1: Osazovací plán směrovače



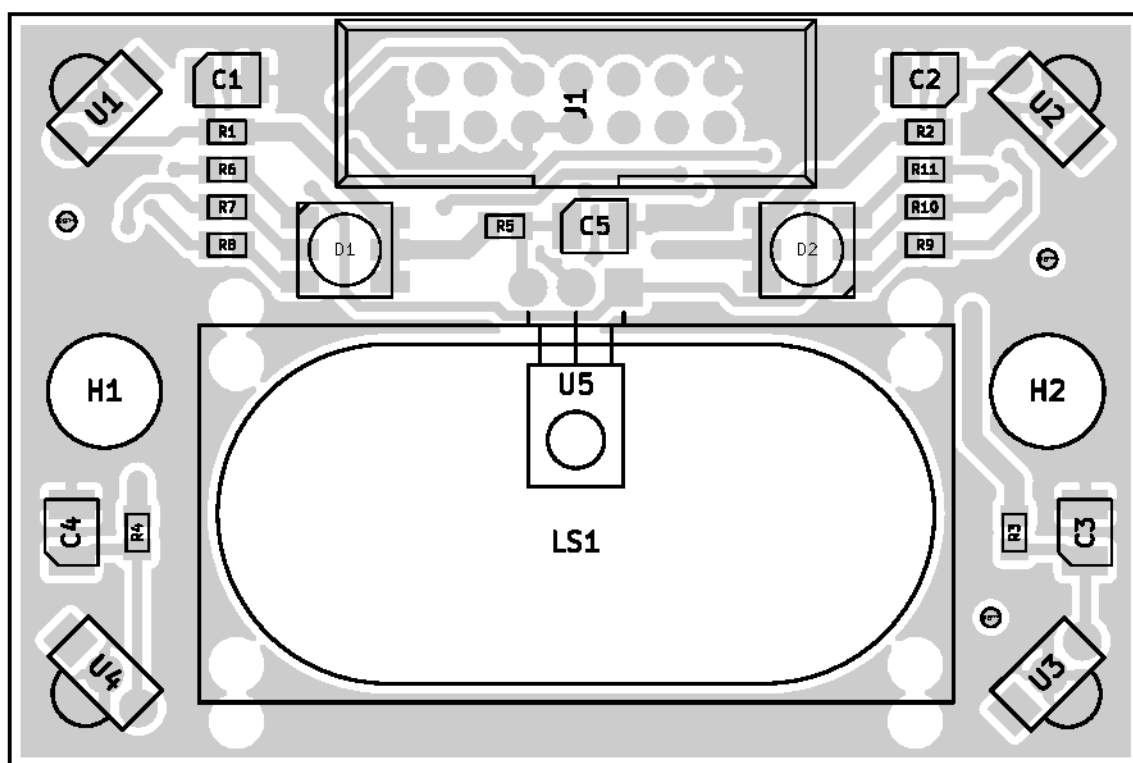
Obr. B.2: Osazovací plán zobrazovací jednotky



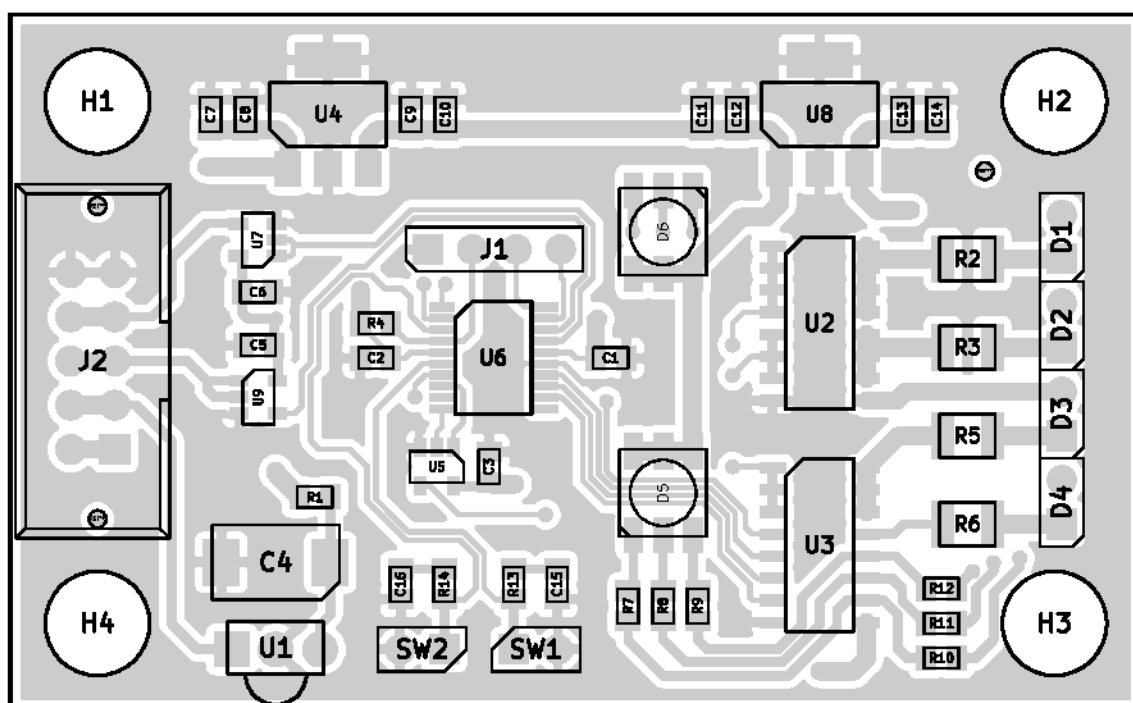
Obr. B.3: Osazovací plán hlavní desky



Obr. B.4: Osazovací plán desky na záda

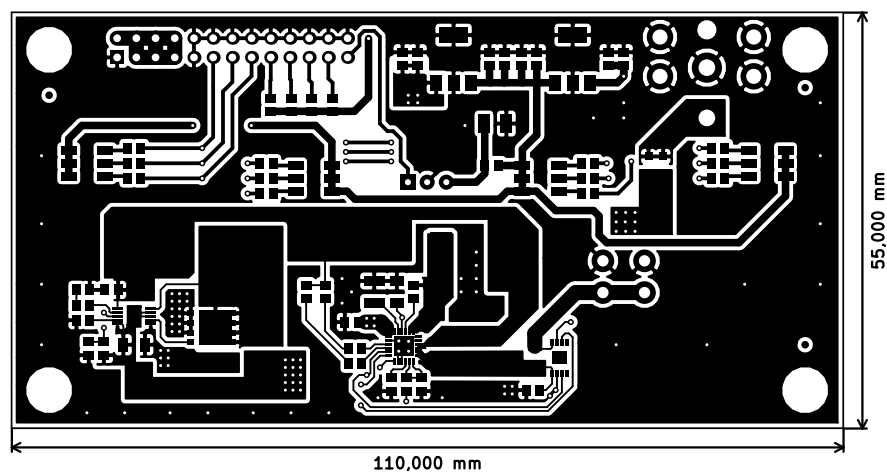


Obr. B.5: Osazovací plán desky na rameno

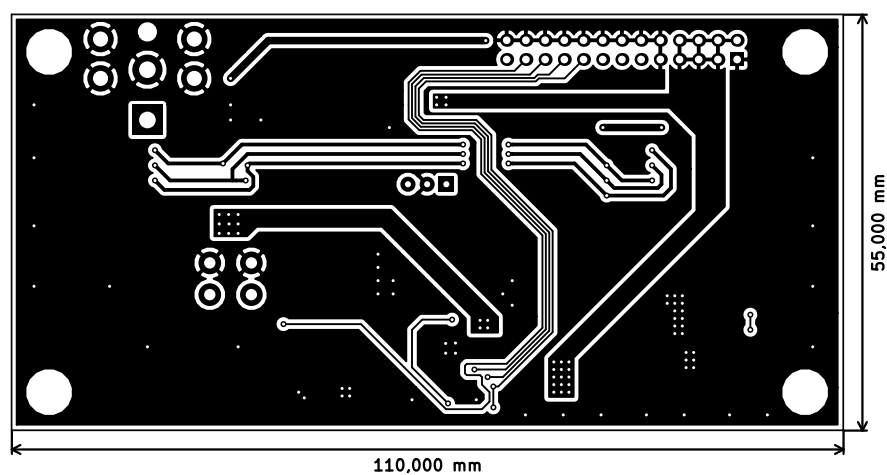


Obr. B.6: Osazovací plán zbraně

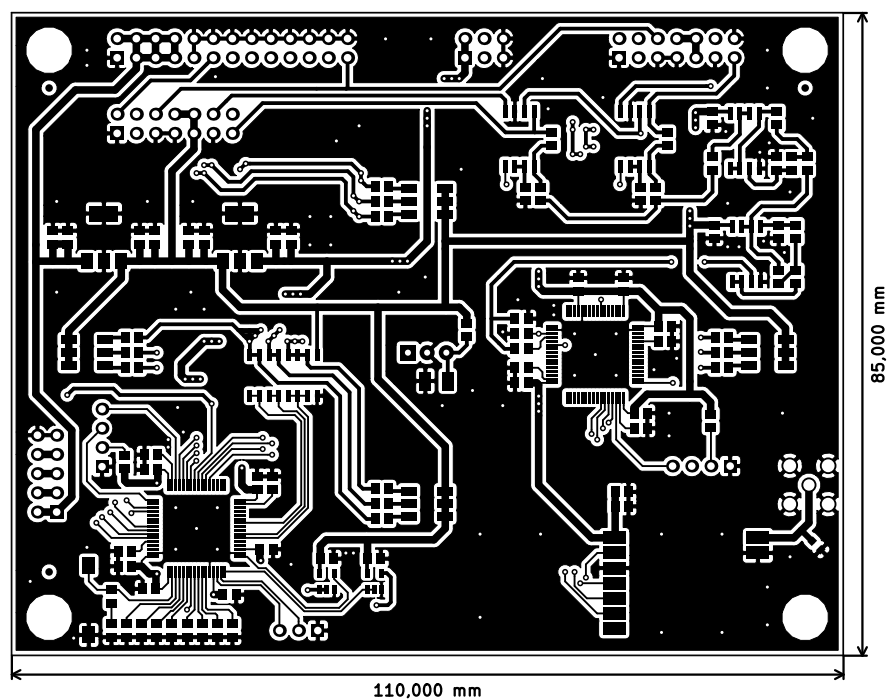
C PŘILOŽENÉ VÝKRESY PLOŠNÝCH SPOJŮ



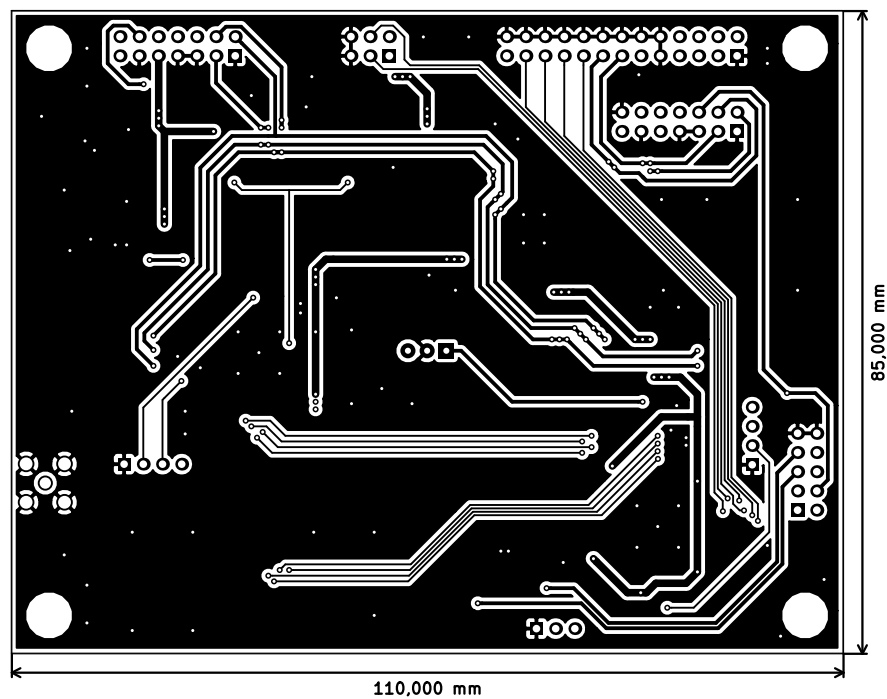
Obr. C.1: Plošný spoj desky na záda v měřítku 1:1, pohled ze strany součástek



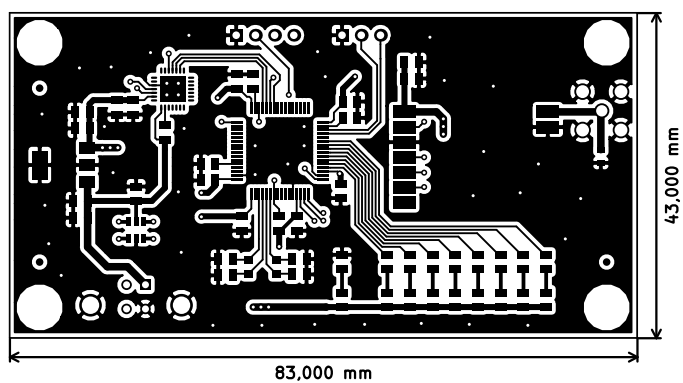
Obr. C.2: Plošný spoj desky na záda v měřítku 1:1, pohled ze strany spojů



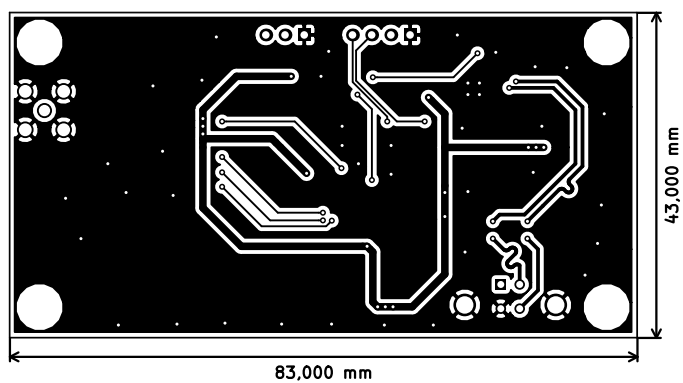
Obr. C.3: Plošný spoj hlavní desky v měřítku 1:1, pohled ze strany součástek



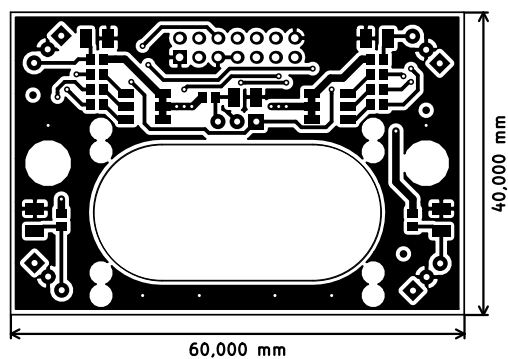
Obr. C.4: Plošný spoj hlavní desky v měřítku 1:1, pohled ze strany spojů



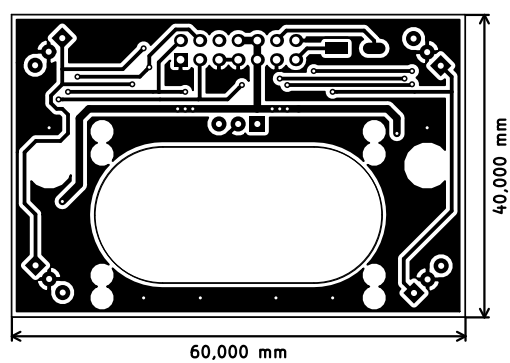
Obr. C.5: Plošný spoj směrovače v měřítku 1:1, pohled ze strany součástek



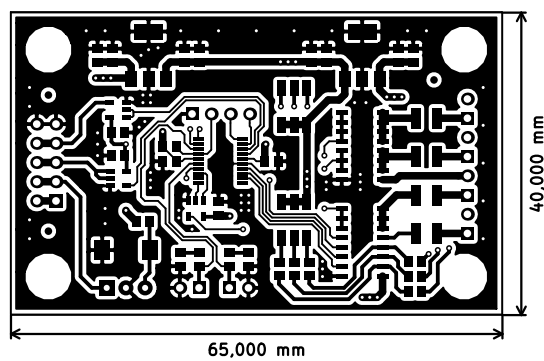
Obr. C.6: Plošný spoj směrovače v měřítku 1:1, pohled ze strany spojů



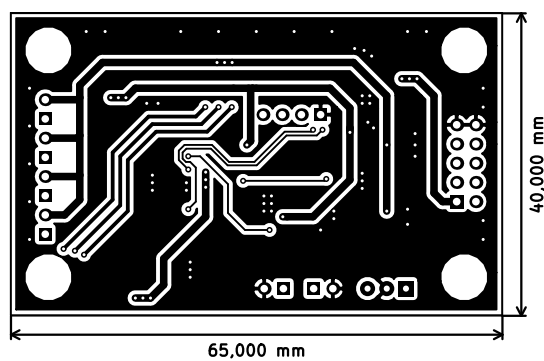
Obr. C.7: Plošný spoj desky na rameno v měřítku 1:1, pohled ze strany součástek



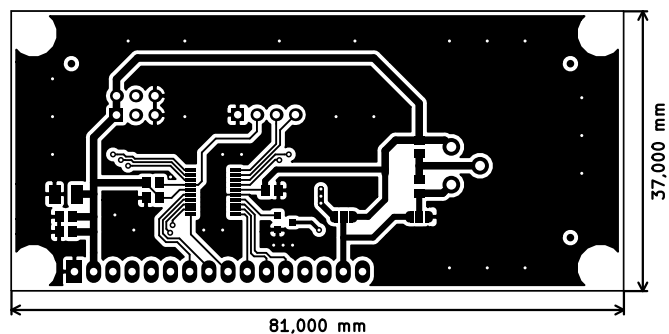
Obr. C.8: Plošný spoj desky na rameno v měřítku 1:1, pohled ze strany spojů



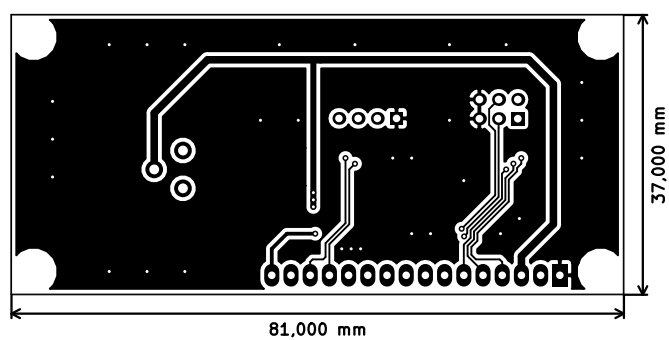
Obr. C.9: Plošný spoj zbraně v měřítku 1:1, pohled ze strany součástek



Obr. C.10: Plošný spoj zbraně v měřítku 1:1, pohled ze strany spojů

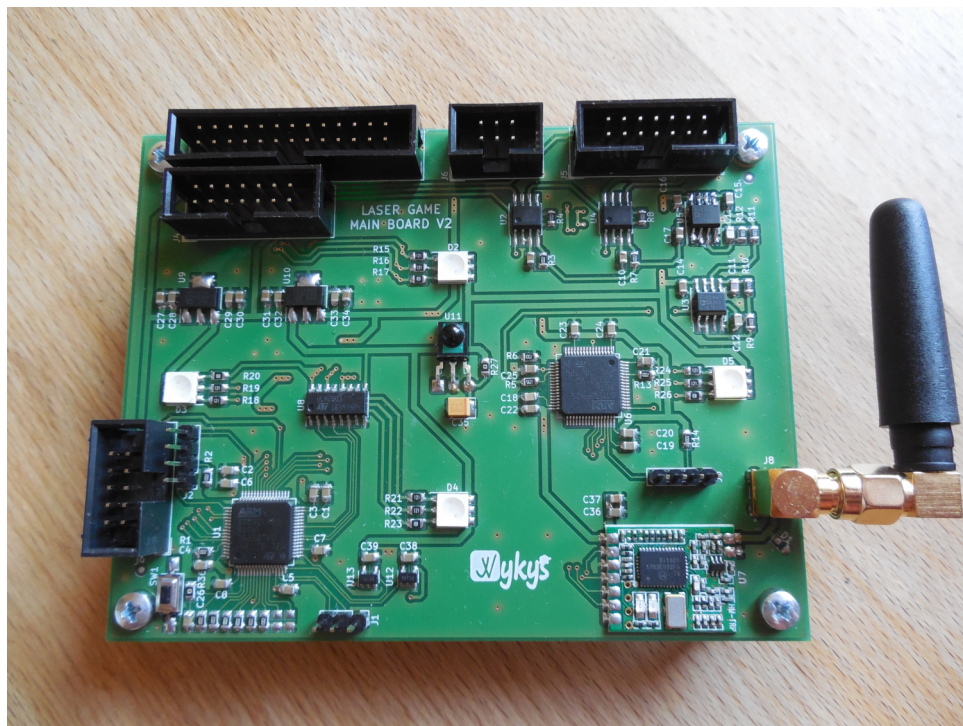


Obr. C.11: Plošný spoj zobrazovací jednotky v měřítku 1:1, pohled ze strany součástek

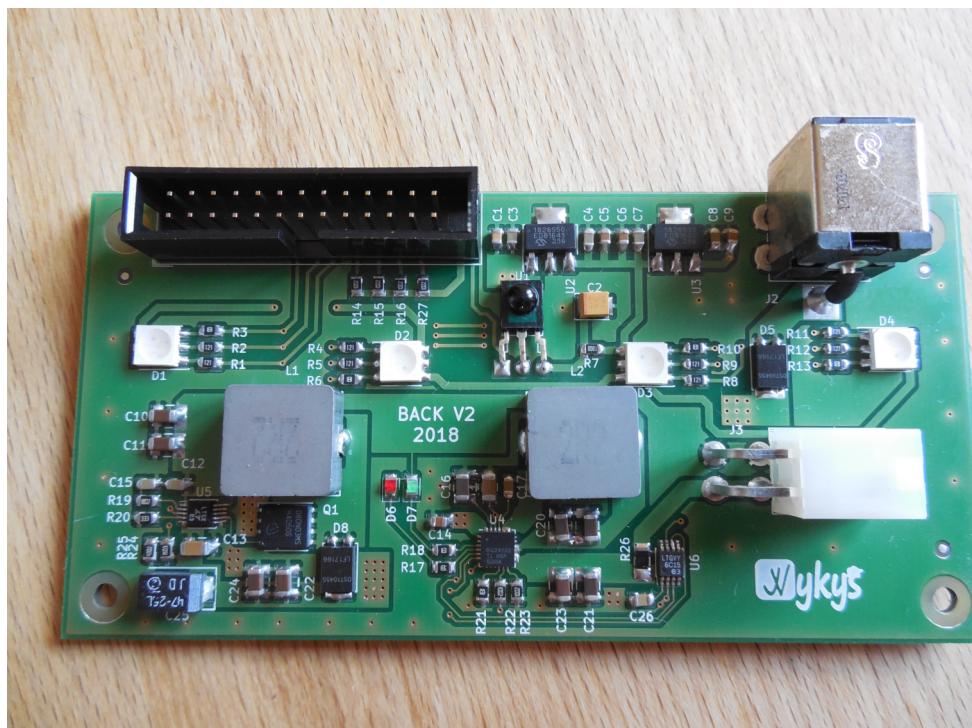


Obr. C.12: Plošný spoj zobrazovací jednotky v měřítku 1:1, pohled ze strany spojů

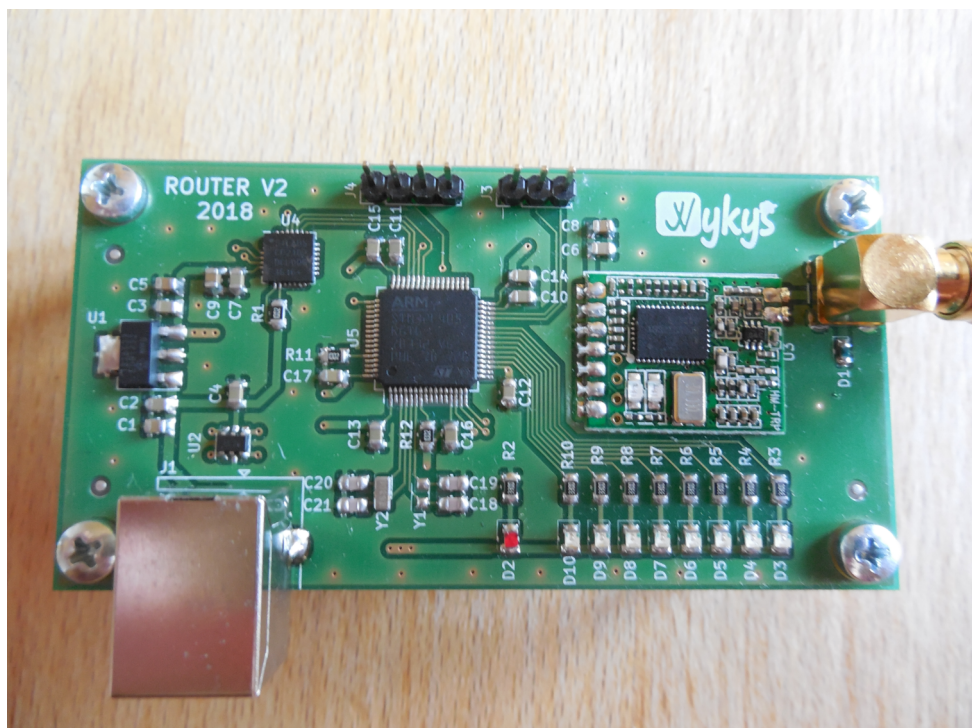
D FOTO DOKUMENTACE



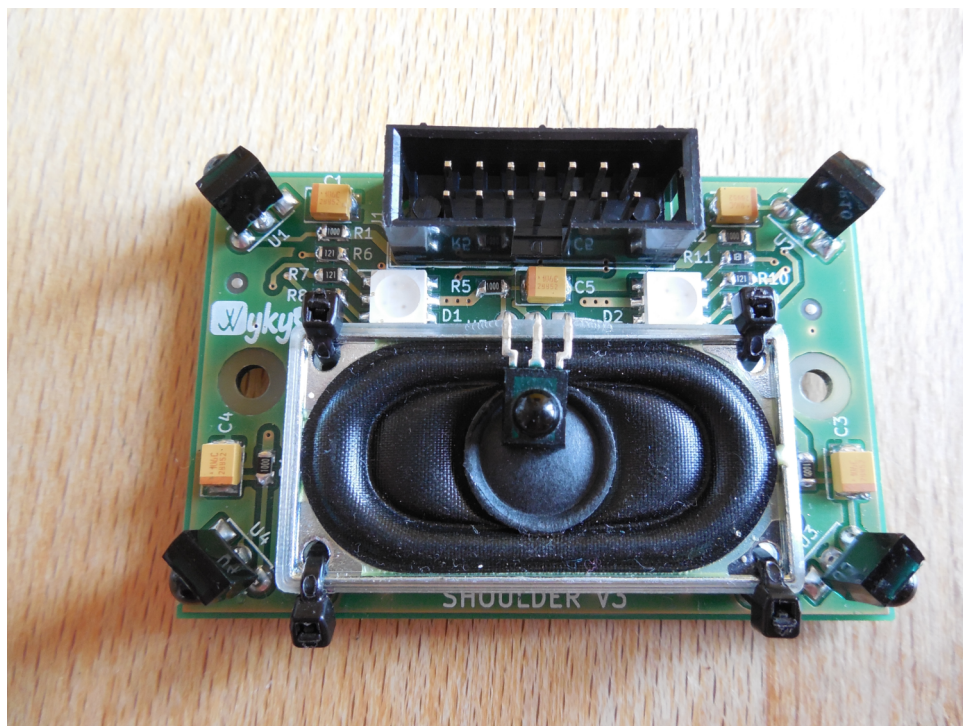
Obr. D.1: Fotografie hlavní desky



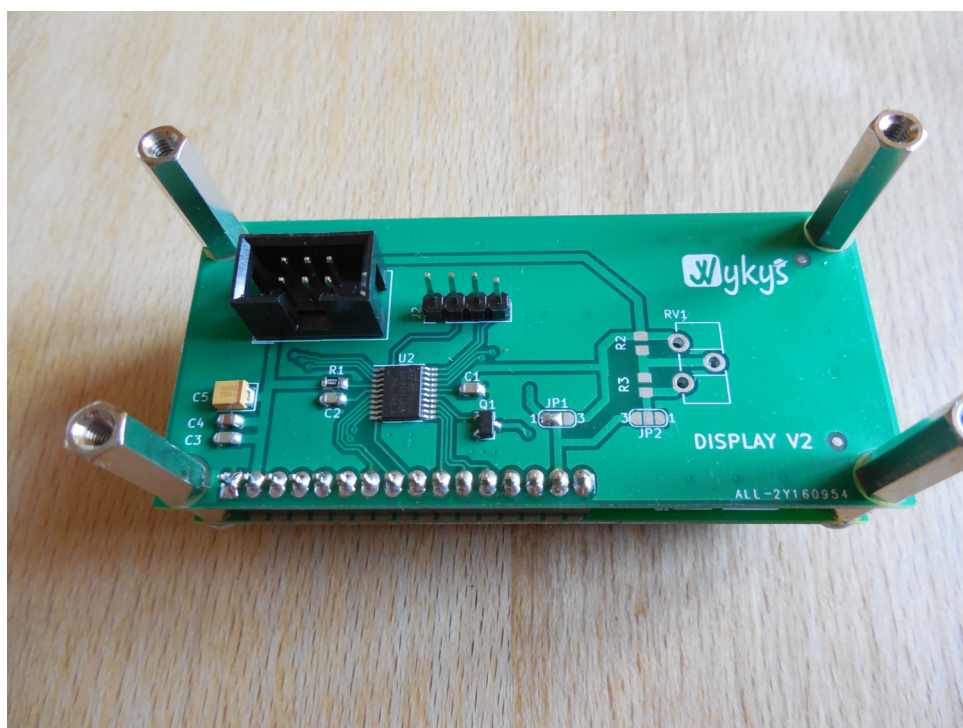
Obr. D.2: Fotografie desky na záda vesty



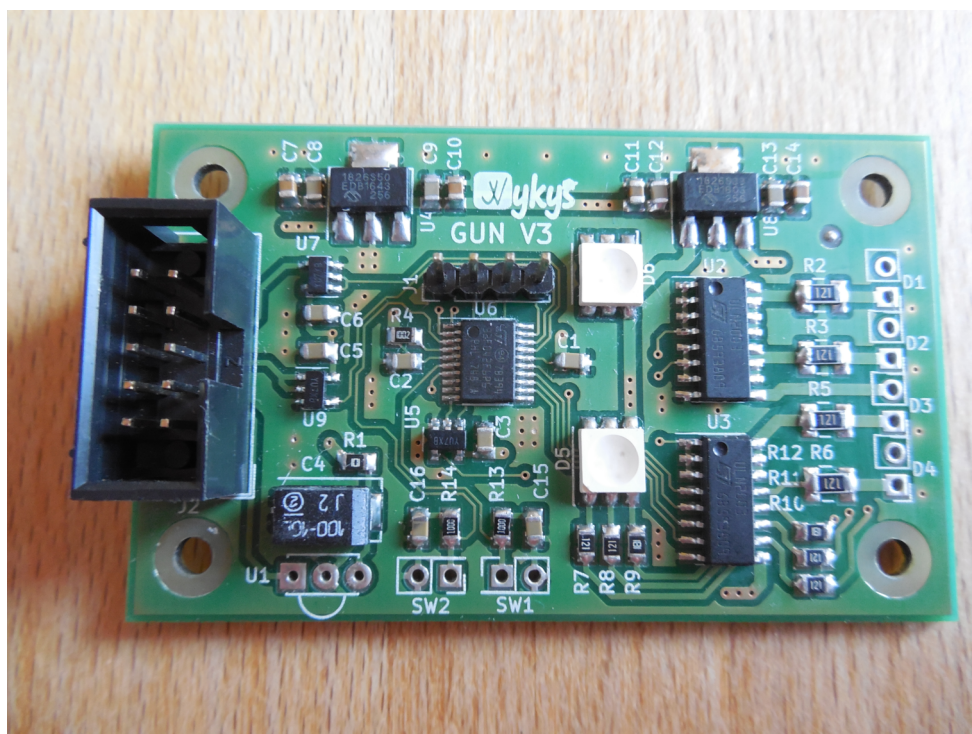
Obr. D.3: Fotografie směrovače



Obr. D.4: Fotografie desky na rameno



Obr. D.5: Fotografie desky zobrazovače



Obr. D.6: Fotografie desky zbraně



Obr. D.7: Kompletní sada elektroniky pro jednoho hráče